

**ZUM KONTINUIERLICHEN TRENNPRESSEN
BIOGENER FESTSTOFFE IN SCHNECKENGEOMETRIEN
AM BEISPIEL GESCHÄLTER RAPSSAAT**

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

dem Fachbereich 12 – Maschinenwesen –
der Universität Duisburg-Essen

vorgelegte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Christian Schein
aus Essen

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Mai 2003

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. F. H. Schneider
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. B. Gampert

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr.-Ing. F. Steimle

Erratum

betreffend die Angaben zum Wassergehalt der Versuchsmaterialien

Die exakte Bestimmung des Wassergehalts und der flüchtigen Bestandteile von Ölsaaten erfordert die Trocknung (Dörr-Wäge-Methode) bis zur Gewichtskonstanz. Aufgrund der im

Rahmen dieser Arbeit analysierten, großen Zahl an Proben war die Einhaltung der erforderlichen Trocknungsdauer bis zur Erreichung der Gewichtskonstanz nicht möglich. Da keine Trocknung bis zur Gewichtskonstanz durchgeführt wurde, können entsprechende Fehler bei den absoluten Angaben zum Wassergehalt auftreten. Aktuelle Laboruntersuchungen (Jan./Febr. 2001) im Fachgebiet Lebensmittel-Verfahrenstechnik zeigen insbesondere bei Rapshüllen eine sehr lange Trocknungsdauer; nach 33 Tagen bei $103\text{ °C} \pm 2\text{ K}$ im HAG-Gerät (Brabender) ist die geforderte Gewichtskonstanz noch nicht erreicht.

Die in Europa gebräuchliche DGF- Standardmethode (B-I 4 [87], identisch mit ISO 665-1977) zur Wasserbestimmung von Ölsaaten definiert im Hinblick auf eine praktikable Anwendung folgendes Abbruchkriterium. Die Bestimmung ist beendet, wenn die Gewichtsabnahme nach aufeinander folgenden Messungen ($103\text{ °C} \pm 2\text{ K}$ und atmosphärischem Druck, initiale Trocknungsdauer 3 h) mit 1 h dazwischen liegender Trocknungsdauer gleich oder kleiner als 0,1 % der Einwaage erreicht ist.

In Abweichung zu der DGF-Standardmethode wurde im Rahmen dieser Arbeit dem Wassergehalt der Versuchsmaterialien nach 4 h Trocknungsdauer die, bei einer Trocknungsdauer von 24 h ermittelte durchschnittliche statistische Zunahme von $\Delta xW = 0,16\text{ %}$ hinzu addiert. Bei diesem Verfahren wurde aus zeitlichen Gründen die Wiederholungsmessung nach einer weiteren Trocknungsdauer von 1 h nicht durchgeführt. Diese Modifikation zu der DGF-Standardmethode wurde angewendet um die bei einer bereits 1996 durchgeführten Untersuchung festgestellten längeren Trocknungsverläufe von Rapssaatfraktionen zu berücksichtigen. Die Auswertung von 72 Trocknungsversuchen (24 h; $103\text{ °C} \pm 2\text{ K}$; HAG-Gerät) von Rapssaatproben unterschiedlicher Zusammensetzung zeigt folgendes Ergebnis: bei einer Trocknungsdauer von 24 h wird das von der DGF geforderte Kriterium einer geringeren Massendifferenz als 0,1 % der Einwaage zwischen zwei Wägungen (4 h Differenz anstatt der geforderten 1 h) immer eingehalten. Selbst bei einer Verdopplung der Trocknungsdauer von 4 h auf 8 h liegt die Massendifferenz bis auf vier Ausnahmefälle unter dem geforderten Schwellenwert. Insgesamt 14 Proben zeigen nach 20 h Massenkonzanz. Bei 8 Proben ist eine Massenzunahme (Oxidationserscheinungen) zu verzeichnen: Bei den restlichen 50 Proben ist noch eine Gewichtsabnahme von durchschnittlich 0,03 % festzustellen. Die Abweichungen zwischen den Messungen nach 4 h und nach 24 h liegen zwischen minimal $\Delta xW = 0,1\text{ %}$ und maximal $\Delta xW = 0,22\text{ %}$. Im statistischen Mittel ergibt sich ein Wert von $\Delta xW = 0,16\text{ %}$, der entsprechend berücksichtigt wurde.

Dadurch liegen die angegebenen Wassergehalte tendenziell höher als bei Einhaltung der DGF-Vorschriften. Die tatsächlichen Wassergehalte können aber, wie die aktuellen Ergebnisse für Rapshüllen zeigen, die angegebenen Werte durchaus noch übersteigen.

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Lebensmittel-Verfahrenstechnik des Fachbereichs 12 der Universität Essen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Felix H. Schneider, der durch die Entwicklung des Schälverfahrens von Rapssaat die Basis für diese Arbeit schuf, danke ich für die interessante Aufgabenstellung und die wissenschaftliche Betreuung mit vielen wertvollen Diskussionen und Anregungen. Die Unterstützung von Herrn Prof. Schneider, auch in Fragen außerhalb der wissenschaftlichen Problematik, half mir manche Schwierigkeiten bei der Erstellung dieser Arbeit zu überwinden.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Gampert bedanke ich mich für die Übernahme des Koreferates und bei Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Steimle für den Vorsitz im Prüfungsausschuß.

Bedanken möchte ich mich ausdrücklich bei den Kolleginnen und Kollegen im Fachgebiet Lebensmittel-Verfahrenstechnik für ihre Unterstützung und die stets freundschaftliche Atmosphäre. Herr Dipl.-Ing. Peter Binz hatte maßgeblichen Anteil an der Schaffung der experimentellen Voraussetzungen. Herr Dr.-Ing. Michael Raß stand immer für intensive Fachgespräche und Diskussionen zur Verfügung. Frau Maria Gaik, Frau Angelika Mücke, Frau Birgit Delfs und Frau Gabriella Lukacs danke ich für die Analyse der vielen Materialproben. Herr Dipl.-Ing. Bernd Gahlmann unterstützte mich jederzeit tatkräftig bei den experimentellen Untersuchungen. Frau Edith Fasching half mir manche organisatorische Hürde zu nehmen.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Studentischen Hilfskräften, Studien- und Diplomarbeitern für ihre Mitarbeit, insbesondere bei Herrn Thomas Pregla.

Die finanziellen Voraussetzungen für diese Arbeit wurde durch ein Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie mit dem Förderkennzeichen 01 ZV 9304/2 (Teilvorhaben Trennpresen geschälter Rapssaat) geschaffen.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, meiner Mutter, meinem Vater, meinem Bruder, für Ihre Liebe und Unterstützung.

Allen Freunden danke ich für ihre Geduld und ihre Ermutigungen in schwierigen Momenten.

Essen, 04.12.02

Christian Schein

**" Wir wagen die Dinge nicht,
weil sie so schwierig sind,
sondern die Dinge sind so schwierig,
weil wir sie nicht wagen "**
(Seneca)

Für Anke

(Das Leben ist nicht fair)

Inhaltsverzeichnis

Symbole	IIV
Zusammenfassung	IX
Einleitung.....	1
1 Zum Stand des Wissens	2
1.1 Vom diskontinuierlichen zum kontinuierlichen Pressen	2
1.2 Geometrie und Aufbau einer Seiher-Schneckenpresse.....	3
1.2.1 Die Geometrie des Pressraums	3
1.2.2 Der Aufbau des Stab-Seihers.....	5
1.2.3 Die Geometrie der Schneckenwelle	5
1.3 Das System Seiher/Schnecke	6
1.3.1 Die Bewegungsverhältnisse in der Seiherkammer	8
1.3.2 Die Kraftreaktion des Komprimats.....	9
1.3.3 Die Druckmessung	10
1.3.4 Die Massen- und Energiebilanzierung	12
1.3.5 Untersuchungen zur Komprimatrheologie von Raps	14
1.4 Problemstellung und Zielsetzung	15
1.4.1 Die Problemstellung	15
1.4.2 Die Zielsetzung.....	16
1.5 Das Arbeitsmodell.....	17
1.5.1 Die geometrischen Bedingungen in der Presskammer	17
1.5.2 Die Bewegung des Komprimats in der Presskammer.....	22
1.5.3 Die Kraftreaktion des Komprimats.....	24
1.5.4 Die Massen- und Energiebilanzierung	27
1.5.5 Die rheologischen Eigenschaften des Komprimats.....	28
2 Versuchstechnik	29
2.1 Das Versuchsmaterial	29
2.2 Die Charakterisierung des Versuchsmaterials	31
2.3 Der Versuchsstand des Schnecken-Experiments	32
2.3.1 Die Seiher-Schneckenpresse	32
2.3.2 Die Druckmessung	34
2.3.3 Die Verweilzeitmessung	36
2.3.4 Die Massen- und Energiebilanzierung	40
2.4 Der Versuchsstand des Linear-Experiments	42
2.5 Relevante Versuchsparameter; Varianten und Grenzwerte	44
2.6 Zur Konzeption des Versuchsprogramms	48
2.7 Die Darstellung der Versuchsergebnisse.....	50

3	Ergebnisse.....	52
3.1	Zur Funktion der Helixgeometrie.....	52
3.1.1	Die Helixgeometrie mit geschlossenem Schneckensteg	52
3.1.2	Der Einfluss unterschiedlicher Seiherkonfigurationen.....	55
3.1.3	Der Einfluss einer Drossel am Mundstück	58
3.1.4	Die Helixgeometrie mit unterbrochenem Schneckensteg	60
3.1.5	Die Helixgeometrie mit degressiver Stegsteigung	67
3.2	Zum Einfluss der Komprimateneigenschaften.....	69
3.2.1	Der Wassergehalt.....	69
3.2.2	Der Hüllengehalt.....	71
3.2.3	Der Aufschlussgrad	73
3.2.4	Die Presstemperatur	76
3.2.5	Die Denaturierung	77
3.3	Zum Betriebszustand einer Schneckenpresse	79
3.3.1	Das Anfahrverhalten bis zum Betriebspunkt	79
3.3.2	Die Charakteristika des stationären Betriebspunkts	84
3.4	Zum kontinuierlichen Trennpresen in Schneckengeometrien	86
3.4.1	Die Kraftreaktion des Komprimats.....	86
3.4.2	Die Komprimatbewegung	91
3.4.3	Die Massenbilanzierung	95
3.4.4	Die Energiebilanzierung	98
4	Diskussion.....	102
4.1	Die "äußeren Größen" Geometrie und Drehzahl.....	102
4.1.1	Die Helixgeometrie	102
4.1.2	Die Kerngeometrie	104
4.1.3	Die Seiherkonfiguration	105
4.1.4	Die Schneckendrehzahl	106
4.2	Die Komprimatreaktionen als "innere Größen"	107
4.2.1	Die Komprimatbewegung	107
4.2.2	Die Kraftreaktion des Komprimats.....	111
4.2.3	Die Komprimateneigenschaften	113
4.3	Das Transformationsmodell Schneckenpresse/Linearpresse	114
5	Schlussfolgerungen und Ausblick	118
5.1	Schlussfolgerungen.....	118
5.2	Ausblick	119
6	Literaturverzeichnis	121
7	Anhang	126

Symbole

A	[mm ²]	Fläche
b	[mm]	Breite
c	[%]	Konzentration
D	[mm]	äußerer Durchmesser
d	[mm]	Durchmesser
E	[kJ]	Energieeinleitung durch die Schneckenhelix
F	[-]	Kraftreaktion des Komprimats
f	[s ⁻¹]	Frequenz
F(t)	[-]	Summenfunktion der Verweilzeit
f(t)	[-]	Dichtefunktion der Verweilzeit
G	[mm]	Gangsteigung
L	[mm]	Länge
M	[Nm]	Drehmoment
m	[kg]	Masse
n	[min ⁻¹]	Drehzahl
P	[mm]	Gangsteigung
p	[bar]	Druck
R	[mm]	äußerer Radius
r	[mm]	Radius
T	[°C]	Temperatur
t	[s]	Zeit
U	[-]	Anzahl Wellenumdrehungen im Messintervall
u	[mm/s]	Geschwindigkeit der Schnecke
v	[mm/s]	Geschwindigkeit des Komprimats
x	[-]	axiale Koordinate
z	[-]	radiale Koordinate

Griechische Symbole

α	[-]	Verteilungskoeffizient der axialen Geschwindigkeiten
γ	[°]	Steigungswinkel der Schneckenhelix
Δ	[-]	Differenz
ϕ	[-]	Winkelkoordinate, Drehrichtung der Schneckenhelix
Φ	[°]	Förderwinkel
κ	[-]	Kompressionlängenverhältnis
Π	[-]	Druckprofil
ω	[mm/s]	Winkelgeschwindigkeit
ω		

Indizes

F	Förderung
H	Schnecke (Helix)
K	Kompression
R	Relaxation
S	Seiher
ax	in Axialrichtung
rad	in Radialrichtung
rot	in Rotationsrichtung
max	maximal, grösste
min	minimal, kleinste
mess	Messung
i	Zählvariable für Druckmesswerte
j	Zählvariable für Druckprofile
k	Zählvariable für gezogene Schilferproben

Ornamente

∨	Minimum
∧	Maximum
—	Mittelwert
*	Gleichgewicht
•	1. Ableitung nach t

Zusammenfassung

Die mechanische Fest/Flüssig-Trennung zur Gewinnung pflanzlicher Öle erfolgt seit Beginn des 20. Jahrhunderts großtechnisch auf Seiher-Schneckenpressen. Der kontinuierliche Pressvorgang und das Pressergebnis im System Seiher/Schnecke werden dabei durch die komplexen Geometrie- und Bewegungsverhältnisse sowie der Komprimatrheologie bestimmt.

Die Betrachtung des wechselwirkenden Systems Presse/Komprimat führt zu einer Differenzierung zwischen "äußeren" und "inneren" Systemgrößen; als äußere Größen sind die Geometrie und die Drehzahl der Schneckenwelle, als innere Größen die Kraftreaktion und die Bewegung des Komprimats anzusehen. Das Ziel experimenteller Untersuchungen ist die qualitative und quantitative Erfassung der Einflüsse dieser Systemgrößen auf den Pressvorgang und das Pressergebnis.

Die Experimente wurden an einer Seiher-Schneckenpresse im Labormaßstab (Durchsatz 40 – 50 kg Saat/h) unter Variation der Schnecken-geometrie, der Seiherkonfiguration und der Wellendrehzahl durchgeführt. Neben dem Studium der Bewegungsverhältnisse in der Presskammer anhand von Verweilzeitmessungen wurde vor allem die Kraftreaktion des Komprimats über die Messung des radialen Pressdrucks untersucht. Die Bilanzierung der Massenströme und der eingeleiteten Energie wurde ergänzend durchgeführt. Untersuchungen zur Komprimatrheologie erfolgten durch Entkopplung des Systems Presse/Komprimat in einer deformationsgesteuerten Linearpresse mit definierter Zylinder/Kolbengeometrie.

Die erzielten Ergebnisse zeigen verschiedene Wechselwirkungen zwischen den "inneren" und "äußeren" Systemgrößen. Eine Veränderung der Helixgeometrie beeinflusst die Funktionalität der Presse deutlich, während die Variation der Kerngeometrie kaum eine Veränderung des Pressergebnisses bewirkt. Die Variation der Schneckendrehzahl bewirkt eine deutliche Veränderung des Komprimatverhaltens bezüglich der Bewegung in der Presskammer und der Kraftreaktion. Aus der Komprimatreaktion im Linear-Experiment können Rückschlüsse für die Komprimatereinstellungen im Schnecken-Experiment gezogen werden, die für die Funktion der Schneckenpresse bezüglich Komprimatdrainage und Rückstellkraft erforderlich sind.

Die Transformation zwischen Linear- und Schnecken-Experiment zur Entkopplung des Systems Presse/Komprimat ist zu überprüfen.

Einleitung

Das kontinuierliche Trennpressen biogener Feststoffe in Schnecken-geometrien stellt eine wichtige verfahrenstechnische Grundoperation zur Abtrennung von Fluiden aus flüssigkeitsführenden Feststoffen dar. Neben der reinen Trennaufgabe, wie sie beispielsweise bei der Entwässerung von Haufwerken vorliegt, muss hier zunächst ein intrapartikulär gebundenes Fluid aus einer strukturierten Feststoffmatrix freigesetzt werden.

Der Nachweis, bei welchen Kombinationen von Kompressions- und Materialparametern Komprimat aus hüllenreduzierter Rapssaat pressbar sind, wurde in einer vorangegangenen Arbeit von RAß [60] durch die Entkopplung des wechselwirkenden Systems Presse/Komprimat in einer Linearpresse untersucht und geklärt. Die Untersuchung des kontinuierlichen Pressvorgangs in einer Seiher-Schneckenpresse erfordert die Rückkopplung der gefundenen Komprimateneigenschaften in Kombination mit den beeinflussenden Geometrie- und Maschinenparametern.

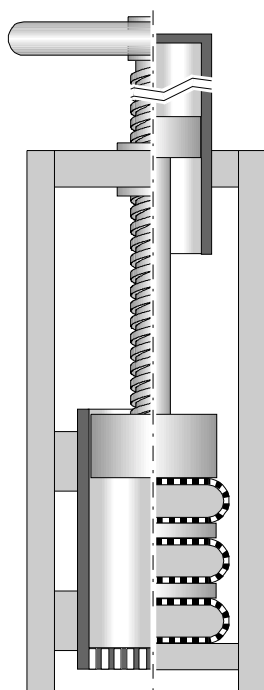
Im Rahmen dieses Vorhabens wird das kontinuierliche Abpressen von Öl aus Ölsaaten in einer Seiher-Schneckenpresse untersucht. Am Beispiel der bisher nicht realisierten Verarbeitung geschälter Rapssaat in Schneckenpressen sollen Fragen zum kontinuierlichen Trennpressen biogener Feststoffe geklärt werden. Dabei steht auf der einen Seite das zu pressende Ausgangsmaterial Rapssaat und auf der anderen Seite das in der Seiher-Schneckenpresse erzielte Pressergebnis.

Im Gegensatz zum vergleichsweise statischen Linear-Experiment ist der Pressvorgang im Schnecken-Experiment von den Bewegungsverhältnissen des Komprimats im Pressraum abhängig. Das Komprimat setzt sich aus einer großen Anzahl biogener fester Einzelpartikel zusammen. Die Bewegungsverhältnisse des im Falle der Rapssaat bipartikulär (Hüllen und Kernfleisch) zusammengesetzten Komprimats werden einerseits durch die geometrischen Verhältnisse der Schneckenpresse und andererseits durch die Komprimatrheologie bestimmt. Die Rheologie ist selbst von den Kompressionsverhältnissen abhängig, die sich wiederum aus der Wechselwirkung der komplexen Geometrie des Systems Seiher/Schnecke und der Komprimatrheologie ergeben.

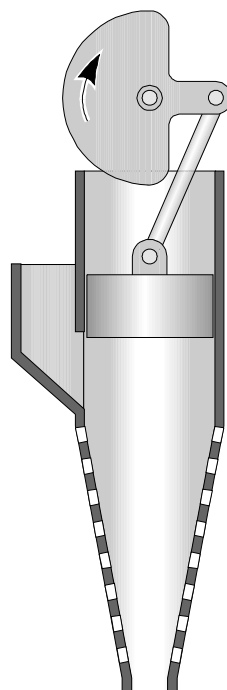
1 Zum Stand des Wissens

1.1 Vom diskontinuierlichen zum kontinuierlichen Pressen

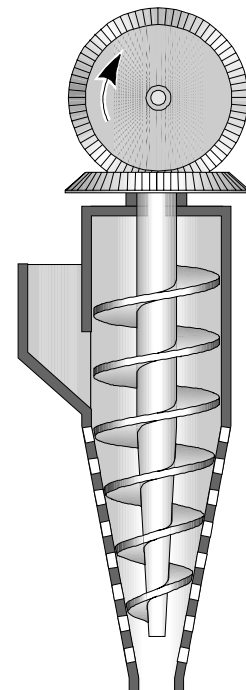
Als ein Auslöser für die Entwicklung eines kontinuierlichen Pressverfahrens ist die zunehmende Industrialisierung der Zuckerproduktion Mitte des 18. Jahrhunderts anzusehen; es galt die Kapazität der eingesetzten Pressen zur Entwässerung der Rübenschnitzel zu erhöhen. Die diskontinuierlich betriebenen Pressen erfuhren mit der Einführung eines hydraulischen Antriebs von BRAMAH [1] aus dem Jahre 1795 eine Verbesserung in Funktionalität und Leistungsfähigkeit. Das Prinzip ist in Abb. 1-1 dargestellt. Ein entscheidender Schritt zur kontinuierlich arbeitenden Presse ist eine Erfindung von BESSEMER und HAYWOOD aus dem Jahre 1849, die mit den heute noch eingesetzten Kolben-Extrudern zu vergleichen ist [2]. Die Vorrichtung besteht aus einem sich verjüngenden perforierten Rohr, in dem ein per Kurbeltrieb oszillierender Kolben das Pressgut quasikontinuierlich in den sich verengenden Pressraum drückt. Der entwässerte Presskuchen wird durch eine Öffnung am Ende des Rohres herausgeschoben (Abb 1-1).



Bramah (1795)



Bessemer u.
Haywood (1849)



Martikke u.
Siegel (1877)

Abb. 1-1: Entwicklungsstufen von der Kolben- zur Schneckenpresse

Eine Weiterentwicklung dieses Prinzips stellt die Erfindung von MARTIKKE und SIEGEL aus dem Jahre 1877 dar, die im eigentlichen Sinn als erste Schneckenpresse anzusehen ist [4] (Abb. 1-1). Für den kontinuierlichen Vorschub des Pressguts in den sich verengenden Pressraum wird hier erstmals eine Schneckenwelle eingesetzt. Die V.D. Anderson Company in Cleveland, Ohio meldete 1903 die erste Seiher-Schneckenpresse zum Abpressen von Öl aus Ölsaaten zum Patent an [5, 6].

1.2 Geometrie und Aufbau einer Seiher-Schneckenpresse

Im konstruktiven Aufbau technischer Seiher-Schneckenpressen sind - unabhängig vom Hersteller - wesentliche prinzipielle Gemeinsamkeiten festzustellen [41, 12, 72]. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die wesentlichen Merkmale der heutigen Konstruktionen bereits vor 100 Jahren ausgebildet waren [5, 6] und danach vorrangig die Leistungssteigerung und Optimierung der Maschinen als Entwicklungsziele verfolgt wurden.

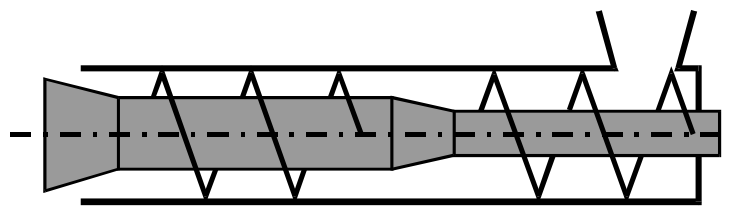
1.2.1 Die Geometrie des Pressraums

Primäres Ziel der Pressoperation ist eine möglichst geringe Rest-ölbelastung im Feststoff und einen möglichst hohen Massendurchsatz. Die eigentliche Funktionalität der Presse wird dabei dominant durch die geometrische Auslegung des Pressraums bestimmt; als Pressraum ist das freie Volumen zwischen der inneren Wandung des zylindrischen Seiher und der Oberfläche der sich darin drehenden Schneckenwelle anzusehen. Die optimale Gestaltung dieses Pressraums ist in der Regel das Ergebnis einer Vielzahl empirischer Entwicklungsschritte, in denen die Geometrie der Schneckenwelle, die Konfiguration des Seiher und die rheologischen und mechanischen Eigenschaften des Komprimats einander angepasst werden.

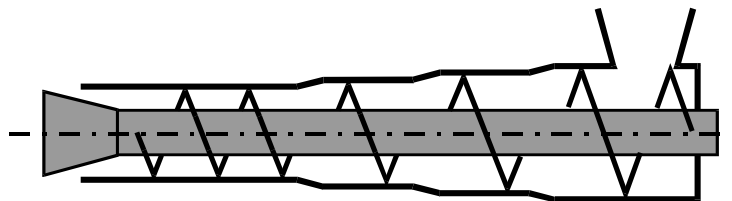
In Abb. 1-2 A ist der Pressraum der ersten kontinuierlich arbeitenden Seiher-Schneckenpresse [5, 6] dargestellt. Er ist durch zwei aufeinander folgende Zonen charakterisiert. In einer Förderzone wird das Pressgut eingezogen und durch Förderung gegen einen konischen Wellenabsatz vorverdichtet. In der darauf folgenden Presszone wird das Material gegen einen Endkonus mit variabler Spaltweite gefördert und stark komprimiert.

Die vom KRUPP-GRUSONWERK MAGDEBURG patentierte Konstruktion einer Stufenseiher-Presse [9] ist durch eine mehrfache stufenförmige Reduzierung des Seiherinnendurchmessers bei konstantem Durchmesser des Wellen-

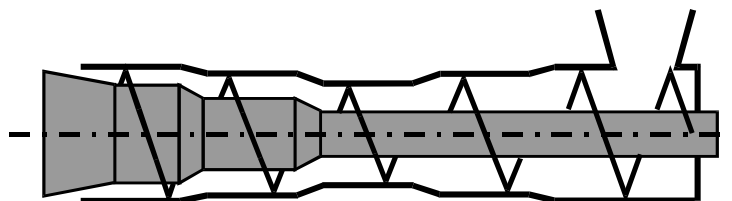
grunds charakterisiert. Durch die mehrfache Abfolge von Kompressions- und Relaxationsstufen können höhere Pressdrücke realisiert und eine grössere Ölausbeute erreicht werden [7] (Abb. 1-2; B).



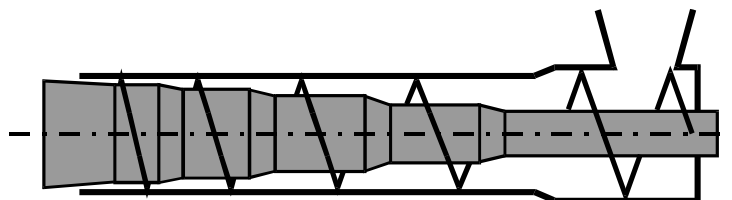
A: Erste industrielle Bauform (Anderson, 1904)



B: Stufen-Seiher (Krupp-Gruson, 1929)



C: 'Taillierter' Seiher (Krupp-Gruson, 1937)



D: Übliche aktuelle Bauform

Abb. 1-2: Entwicklungsstufen von Pressenkonstruktionen

Die Erkenntnis, dass für einen guten Ölabfluss bei hoher Komprimatdichte die Kuchenhöhe (Länge der Ölabflusswege) sowie die Drainagefläche entscheidend sind, führte zu einer Konstruktion mit "tailliertem" Seiher [11] (Abb. 1-2, C). Eine Vergrößerung der Drainagefläche, also der Oberfläche des Komprimats, die von der perforierten Seiherinnenwandung umschlossen wird, erfordert eine Vergrößerung des Seiherdurchmessers. Eine gleichzeitige Reduzierung der Kuchenhöhe bedingt eine Vergrößerung des Schneckenkerndurchmessers in Förderrichtung.

Bei aktuellen Pressenkonstruktionen wird ein in Förderrichtung absatzweise verengter Pressraum durch eine stufenförmige Zunahme des Schneckenkerns realisiert. Die aufwändige Konstruktion eines gestuften

Seihers ist bei vielen Schneckenpressen nur noch im Ansatz als Verdichtungsstufe in der Einzugszone vorhanden (Abb. 1-2, D).

1.2.2 Der Aufbau des Stab-Seihers

Die Konstruktion des Stabseihers basiert auf einer Erfindung von BUSHELL und HAYDON [3] für diskontinuierlich betriebene Kolbenpressen. Längs zur Förderrichtung liegende prismatische Stäbe werden in einem Trägergerüst zu einem im Querschnitt runden Käfig gespannt. Durch Abstandsplättchen zwischen den Stäben bilden sich Spalten, die den Ölabfluss aus dem Pressraum heraus ermöglichen, den Feststoff aber zurückhalten. Zur Minderung der Komprimatrotation wurden zunächst Abstreifer in den Seihers eingesetzt, die in Zonen ohne Schneckensteg bis knapp über dem Schneckenrund in den Pressraum hineinragen [8]. Später folgte der "auf Keil" gestellte Seihers, bei dem eine Längskante eines jeden Stabes gegenüber dem folgenden Stab überhöht ist und so der Reibwiderstand in Umfangsrichtung erhöht wird [47]. Bei heutigen technischen Seiherskonstruktionen ist eine Kombination der Ausführungen üblich (Abb. 1-3).

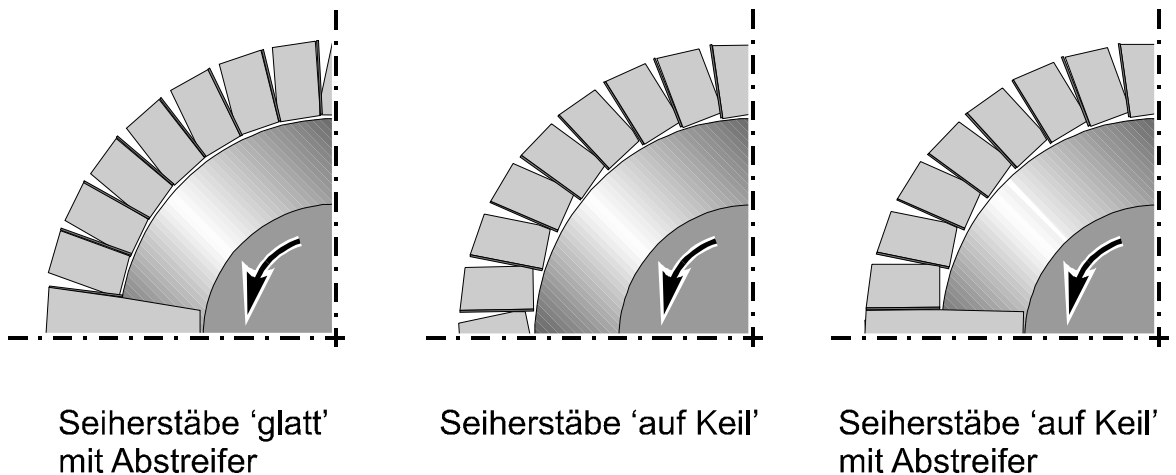


Abb. 1-3: Unterschiedliche Seihers-Konfigurationen bei Schneckenpressen

1.2.3 Die Geometrie der Schneckenwelle

Unter einer Schneckenwelle ist eine Kombination einzelner Schnecken-elemente zu verstehen, die auf einem gemeinsamen Schneckendorn gespannt werden. Die Funktionalität der Schneckenwelle ist durch den Schneckensteg als förderndes Element und dem Schneckenkern als Volumen reduzierendes Element gekennzeichnet. Durch eine Abfolge von Elementen

mit konischer und zylindrischer Kerngeometrie entstehen Pressstufen mit Kompressions- und Relaxationszonen [7, 12, 41, 72].

Die Helixgeometrie technischer Schnecken-Pressen zeichnet sich im Allgemeinen durch einen unterbrochenen Schneckensteg aus [41, 12, 72]. Die Notwendigkeit für dieses Konstruktionsprinzip von Schneckenpressen zur Ölsaatenverarbeitung wird mit einem zu hohen Druckanstieg bei der Kombination von Förderung und Kompression in einer Zone begründet [7]. Bei Schneckenpressen zur Entwässerung oder zur Extrusion [20, 43, 54, 55, 56, 71] ist das Prinzip des geschlossenen Schneckenstegs Stand der Technik. Durch die Abnahme der Gangsteigung in Förderrichtung soll die Komprimatdrainage durch eine Reduzierung der Förder- und Kompressionsgeschwindigkeit möglichst lange aufrecht erhalten, sowie eine vollständige Füllung des Schneckenkanals vor der nachfolgenden Kompressionsstufe erreicht werden; eine Teilfüllung der Gänge würde den Druckaufbau verzögern und die beim Abpressen wirksame Schneckenlänge verkürzen [10, 11, 42].

1.3 Das System Seiher/Schnecke

Die Rheologie des Materials und die Relativbewegung der rotierenden Schneckenwelle zum statischen Seiher sehen MESKAT und RIESS [46] als vorrangiges Problem bei der Umstellung von diskontinuierlich arbeitenden Pressen auf Seiher-Schneckenpressen an. So bewirkt eine ungenügende Reibung zwischen Komprimat und Seiherwandung eine verstärkte Rotation des Materials mit der Schnecke. Ein Axialschub wird mit Hilfe der rotierenden Schnecke nur dann auf das Material übertragen, wenn die in Umfangrichtung wirkenden Schubspannungen klein und damit die Reibung zwischen Schnecke und Komprimat möglichst gering ist. Unter diesen Bedingungen können auf das Komprimat Normalspannungen übertragen werden, die einen lokalen Pressdruck erzeugen und die Fest-Flüssig-Trennung einleiten [20]. Der kontinuierliche Pressvorgang im System Seiher/Schnecke ist also im Wesentlichen durch eine Wechselwirkung von Materialbewegungen und Kraftreaktionen geprägt.

SCHNEIDER [68] analysiert die Funktion einer Seiher-Schneckenpresse, die sich aus der Wechselwirkung von Schnecke, Stabseiher und Komprimat ergibt. Die Abb. 1-4(a) zeigt für den angenommenen Fall einer rein axialen Förderung die Veränderung des Komprimats vom Zustand 1 zum Zustand 2 bei einer Umdrehung für eine kernprogressive Schnecke. Der Presskuchen wird während des axialen Transports um eine Gangweite des Schneckenstegs

radial komprimiert. Die erforderliche Hinderung des Materials an der Rotation im Pressraum ergibt sich durch die in Abb. 1-4(b) dargestellten Reibungsverhältnisse des Komprimats mit Seiher und Schnecke. Ein Stabseiher mit auf Keil angestellten Stäben erfüllt die Bedingung, dass die Tangential-Reibungskraft R_S zwischen Kuchen und Seiher grösser ist als die Reibungskraft R_H zwischen Kuchen und Schnecke. Voraussetzung für die Reibungskräfte und damit erste wesentliche Forderung ist eine hinreichend grosse elastische Rückstellkraft F des Komprimats, die sich aus dem Widerstand gegen die Volumenverminderung ergibt.

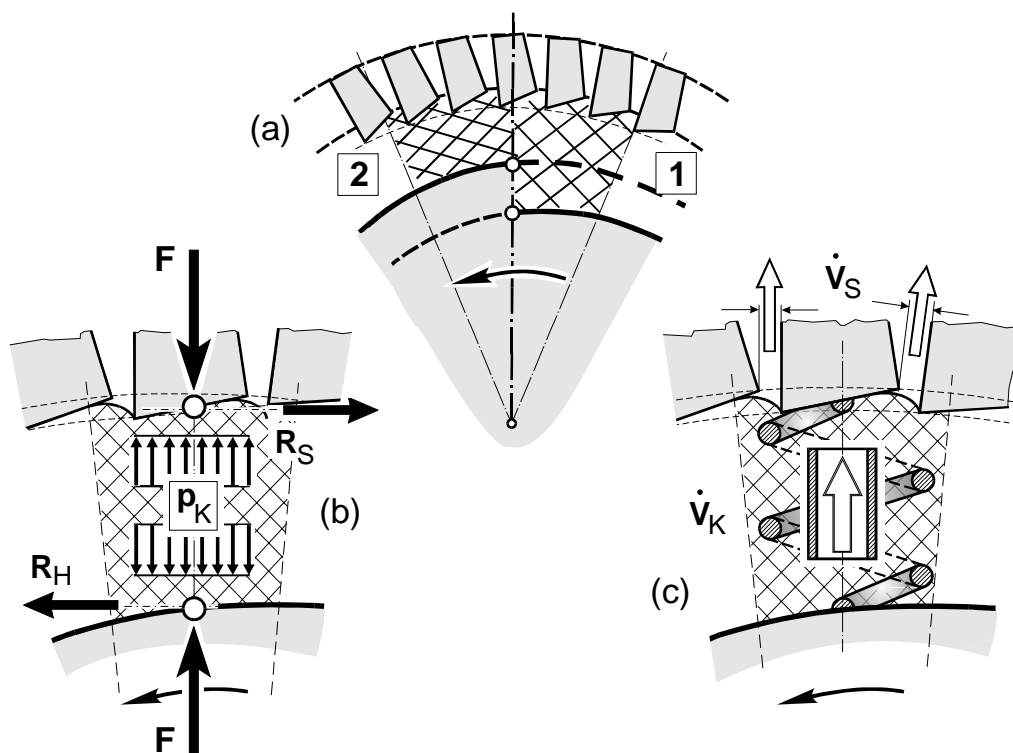


Abb. 1-4: Kernprogressive Schnecke im Stabseiher: (a) Kompression bei einer Umdrehung, (b) Reibungsbedingungen und Rückstellkraft, (c) Drainage und Abfluss aus dem Seiher, variiert nach SCHNEIDER [68]

Die Volumenreduzierung des Komprimats bei axialem Transport in der Schneckenpresse ist nur bei Ölabbfluss \dot{v}_K durch das Komprimat und Abflussstrom des Öls \dot{v}_S durch die Seiherpalte nach Abb. 1-4(c) möglich. Voraussetzungen sind ein hinreichend grosser Druckgradient und eine gute Drainage vom Komprimatgrund bis zum Seiher. Damit ergibt sich als zweite wesentliche Forderung die hohe Drainage des Komprimats. Rückstellkraft und Drainage des Komprimats können durch Feder und Kapillare symbolisiert werden [68].

1.3.1 Die Bewegungsverhältnisse in der Seiherkammer

BELOBORODOV [21] berichtet von einer helixförmigen Bewegung des Komprimats in Seiher-Schneckenpressen, beeinflusst durch Geometrie und Rotation der Schneckenwelle. MESKAT [47] bezeichnet die arbeitende Schneckenpresse als ein ausgeprägt kraftschlüssiges System im Gleichgewicht, in dem sich das Material in Abhängigkeit vom Kompressionsgrad helixförmig durch die Seiherkammer bewegt. WARD [76] beschreibt ebenfalls eine helixförmige Bewegungsänderung des Materials in der Presskammer in Abhängigkeit vom Kompressionsgrad. Eine verstärkte Materialrotation in der Einzugszone wird mit steigender Kompression in eine zunehmend axiale Bewegung überführt, die durch zwei sich überlagernde Geschwindigkeitskomponenten beschrieben werden kann [37]. DARNELL und MOL [26] formulieren für den Feststofftransport in Schneckenmaschinen unter vereinfachenden Annahmen ein mathematisches Modell; zur Beschreibung der aus der helixförmigen Bewegung resultierenden Förderrichtung führen die Autoren den Begriff des Förderwinkels ein.

Eine Quantifizierung der Geschwindigkeitskomponenten der Komprimatbewegung scheint schwierig. TOLCHINSKIJ [73] berichtet über einige Arbeiten zur Analyse der Materialbewegung im Schneckenkanal. Das in allen Fällen zugrunde gelegte Modell des abgewickelten ebenen Schneckenkanals mit beweglicher Platte als Seiher [46], führt zu komplexen Gleichungen mit empirisch zu ermittelnden Koeffizienten für Dichte, Ölgehalt und Rheologie des Komprimats. Die von NAZAROV et al. [50] vereinfachende Annahme eines Bingham-Körpers im Schneckenkanal führt zu ähnlichen Ergebnissen. PAWLOWSKI [52] weist darauf hin, dass die komplexen Materialströmungen in Schneckenmaschinen die Verweilzeit entscheidend beeinflussen werden. In der Kunststofftechnik wird das Verweilzeitverhalten der Schmelze im Schneckenkanal als eines der wichtigsten Auslegungskriterien für Extruder betrachtet [56]. So sind auf dem Gebiet der Kunststoffextrusion eine Reihe von Berichten zu dieser Thematik zu finden [54, 55, 56] - über Arbeiten zur Verweilzeitmessung in Seiher-Schneckenpressen jedoch nicht. Die Verweilzeitmessung bietet sich aber als Methode zur Untersuchung der Komprimatbewegung an, da mit der Kenntnis des axial zurückgelegten Wegs und der dafür benötigten Zeit eine Aussage über die axiale Vorschubgeschwindigkeit [23, 55] und über die reale Transportgeschwindigkeit möglich wäre.

1.3.2 Die Kraftreaktion des Komprimats

Durch den rotierenden Schneckensteg wird mechanisch Energie in das Komprimat geleitet [43]. In Abhängigkeit vom Steigungswinkel der Schneckenhelix teilt sich die eingeleitete Energie in eine axiale und in eine in Rotationsrichtung wirkende Komponente auf [26]. Unter der Voraussetzung, dass das Komprimat Kräfte übertragen kann, werden durch die Rotation der Schneckenwelle Schubspannungen in Umfangsrichtung eingeleitet, die von den Reibungsbedingungen an der rotierenden Schnecke und am statischen Seiherr beeinflusst werden. Durch den Materialvorschub gegen die axialen Reibwiderstände an Seiherr und Schnecke in den sich verengenden Pressraum werden Spannungen in axialer und radialer Richtung übertragen [20, 29, 76, 78]. Bezogen auf eine definierte Fläche können diese Spannungen über die sich einstellenden Pressdrücke gemessen werden.

MOROZOV [48, 49] stellt im direkten Vergleich zwischen einer Seiherr-Schneckenpresse mit einer kontinuierlichen Zunahme des Schneckenkerns und einem Pressgranulator mit einer Drossel am Mundstück signifikant unterschiedliche Druckprofile fest. Eine kontinuierliche Volumenreduktion bewirkt ein bogenförmiges Druckprofil mit einem Maximum in der Mitte der Presskammer, während eine starke Drosselung am Ende der Presskammer einen stark progressiven Druckverlauf mit einem Maximum direkt vor dem Drosselelement zur Folge hat [40]. HOMANN [35] stellt ebenfalls fest, dass markante Drosselstellen im Pressraum einen sägezahnartigen Druckverlauf bewirken, während eine kontinuierliche Volumenreduktion einen bogenförmigen Druckverlauf verursacht (Abb 1-5).

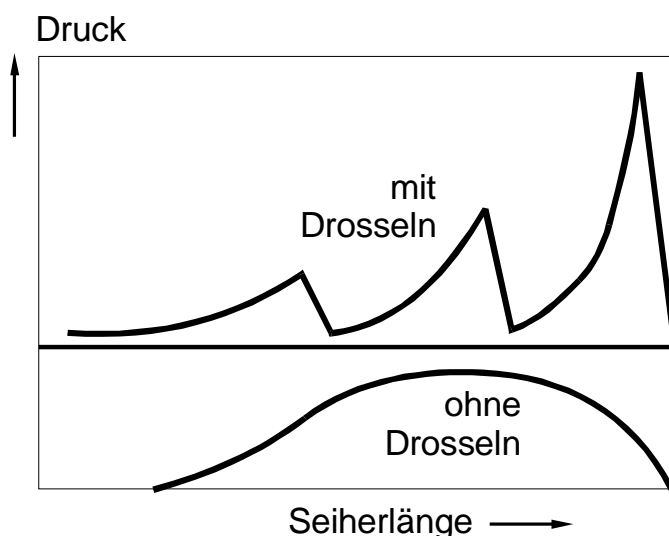


Abb. 1-5: Druckverlauf über die Seiherrlänge bei Schneckenpressen, variiert nach HOMANN [35]

Das Druckniveau wird dabei durch verschiedene Funktionsabschnitte in der Presskammer beeinflusst [76].

In der Zuführ- oder Fütterzone wird die lockere Komprimatschüttung vor dem Eintritt in die Seiherkammer vorverdichtet. Dabei wird in Förderrichtung ein Druckgradient aufgebaut. In diesem Druckgradienten sieht WARD [76] zwei wesentliche Probleme: Erstens ist die Gefahr des Zurückfliessens von Pressöl aus der Seiherkammer in Richtung des Druckgefälles gegeben. Zweitens ist der Druckanstieg kontraproduktiv zum Materialeinzug. Das Material kann erst axial transportiert werden, wenn eine ausreichend hohe elastische Rückstellkraft aufgebaut wurde. In der Verdichtungszone erreicht der Pressdruck durch die zunehmende Kompression sein Maximum [76, 35]. In der Pfropfzone wird das Komprimat als kompakter Festkörper durch den Schneckenkanal geschoben. Zur Auswurföffnung hin ist dann ein stark abfallender Druckgradient festzustellen [76]. HOMANN [35] sieht in derselben Beobachtung einen Hinweis für einen Förderwirkungsgrad grösser eins; damit wird versucht, den Verschleiss der hinteren Schneckenflanke mit einer Überströmung durch das Komprimat zu erklären.

Die Beeinflussung und Erhöhung des Druckniveaus erfolgt durch den sich in Förderrichtung verengenden Pressraum. Bei kleinen Ölpresen in Extruder-Bauweise wird zur Druckerhöhung auf Grund der kurzen Baulänge eine Verengung am Feststoffauswurf in Form einer Enddrossel eingesetzt [24, 70, 74]. WARD [76] weist darauf hin, dass bei den grösseren Seiher-Schneckenpressen die Funktion und Wirkung einer Enddrossel im Allgemeinen überbewertet wird; der Einfluss einer Enddrossel ist zu klein und kommt am Mundstück der Presse viel zu spät, um die Mängel einer ungenügend abgestimmten Schneckenengeometrie auszugleichen. Neben der Volumenreduktion durch eine Zunahme des Schneckenkerns oder durch Drosselelemente sieht EGGERS [29] auch in der kontinuierlichen Verringerung der Steigung des Schneckenstegs eine Ursache für eine Druckerhöhung über die Seiherlänge.

1.3.3 Die Druckmessung

Obwohl aus der Praxis die anisotrope Druckausbreitung bei komprimierten Ölsaaten bekannt ist [28], wird bei der Betrachtung des Pressvorgangs im Allgemeinen nur zwischen einem axialen, in Förderrichtung wirkenden Druck und einem radialen, auf die Seiherwandung wirkenden Druck unterschieden [21]. ZAJIC et al. [78] vermuten zwischen dem axialen und dem radialen Druck ein proportionales Verhältnis. Diese Annahme wird damit begründet, dass sich die Reibungskoeffizienten während des Pressvorgangs nur geringfügig verändern [71]. Auch MERRIKIN und WARD [45, 76, 77] stellen fest, dass der axiale

Druck qualitativ dem radialen Druckverlauf entlang der Seiherkammer folgt. Dabei kommt nach Ansicht von EGGERS [29] dem von den Schneckenflanken ausgeübten axialen Druck in erster Linie die Transportaufgabe zu, das Material gegen die Reibwiderstände an Seiher und Schnecke in Bereiche kleiner werdender Fördervolumina zu pressen. Eine praktische Messung des axialen Drucks ist schwierig [76] und nur integral möglich [29, 49].

Die auf die Seiherinnenflächen radial wirkenden Spannungen können dagegen relativ einfach über Druckaufnehmer an beliebigen Stellen entlang des Seiher erfasst werden [19, 29, 30, 31, 35, 40, 48]. Die gemessenen Druckwerte schwanken dabei an jeder diskreten Messstelle zwischen einem Minimalwert und einem Maximalwert [62]. MOROZOV [49] interpretiert den Minimaldruck als einen statischen Druckanteil und die Schwankung zwischen Minimaldruck und Maximaldruck als einen dynamischen Druckanteil; die Differenz zwischen den Druckanteilen liegt zum Teil bei über 50 %, die Frequenz der Amplitude entspricht der Drehzahl der Schneckenwelle [29, 40, 78]. ZAJIC et al. [78] untersuchen den Amplitudenverlauf genauer und stellen qualitative Unterschiede zwischen verschiedenen Messstellen fest, für die sie einen Rückfluss des Komprimats zwischen Schneckensteg und Seiherwandung und einen Materialrückfluss zwischen den Unterbrechungen der Schneckenhelix verantwortlich machen. KNUTH et al. [40] und EGGERS [29] bringen die periodischen Schwankungen mit der Geometrie des Schneckenstegs in Verbindung und weisen darauf hin, dass der Druck an der treibenden Stegflanke am grössten ist und der Minimaldruck hinter der ziehenden Flanke des Schneckenstegs liegt. Die alternierenden radialen und axialen Pressdrücke jeder diskreten Messstelle werden zum Teil durch Mittelwerte als Ersatzgrösse [29, 45, 48, 49, 76] oder durch einfache Graphen ohne weitere Angaben [35, 40] dargestellt. ZAJIC et al. [78] stellen die gemessenen statischen und dynamischen Druckanteile in getrennten Diagrammen dar.

ALYMOV und BELOBORODOV [19] unterteilen den radialen Pressdruck in einen Fluid- und einen Solidanteil. In Experimenten wurde versucht, die Höhe des Fluiddrucks bei der Verarbeitung von Sonnenblumensamen zu erfassen. Bei den mit U-Rohr-Manometern gemessenen Fluiddrücken sind ebenfalls periodische Schwankungen zu verzeichnen. Die Höhe der gemessenen Drücke ist jedoch extrem niedrig.

Über das Druckniveau in Schneckenpressen sind in der Literatur unterschiedliche Angaben zu finden. Das Spektrum der Gesamtdrücke reicht von 90 bar bei Vorpressen [29] und bis zu 1500 bar bei Fertigpressen [75].

1.3.4 Die Massen- und Energiebilanzierung

Betrachtungen und Aussagen zu Massen- und Energieumsätzen sind in Arbeiten über Schneckenpressen zunächst nicht allgemeingültig, sondern immer als Ergebnis der Wechselwirkungen zwischen einem speziellen Pressgut und der eingesetzten Schneckenmaschine zu sehen. Neben einer Reihe von Betriebsberichten mit speziellen Pressgütern sind aber auch einige Arbeiten mit darüber verallgemeinernden Betrachtungen zu finden.

AUSTMEYER [20] stellt bei der Entwässerung von Zuckerrübenschnitzeln mit der Erhöhung der Schneckendrehzahl eine Erhöhung des Massendurchsatzes und einen erhöhten Expulsatabfluss mit reduziertem Trubgehalt fest. Die Verrichtung von Pressarbeit zur Trennung der flüssigen von der festen Phase erfordert den Einsatz von Energie, die auf eine bestimmte Weise in das System eingeleitet werden muss. Einfluss auf den Energiebedarf haben dabei das Arbeitsprinzip (Druck und/oder Scherung), sowie Bauart, Konstruktion und Betriebsweise der Presse. Den geringsten Energiebedarf weist die reibungsfrei arbeitende Kolbenpresse auf, die bei einer möglichst langen Pressdauer mit möglichst kleinen Pressdrücken betrieben wird. Der in der Kolbenpresse ermittelte spezifische Energiebedarf kann jedoch nicht auf die Schneckenpresse mit zum Teil erheblichen Scherkräften übertragen werden. Diese Scherkräfte bewirken auf der einen Seite eine Gutumwälzung und als Folge eine Erhöhung des Abpressgrades. Sie erfordern auf der anderen Seite aber einen erheblichen Energieaufwand.

EGGERS [29] untersucht bei der Verarbeitung von Raps das Abflussbild am Seiher, bei dem im ersten Abschnitt kein Expulsataustritt festzustellen ist. In der Seihermitte erreicht der Ölabfluss dann sein Maximum und fällt zum Seiherende hin wieder ab. In diesem Zusammenhang wird die energetische Optimierung der Schneckenengeometrie als ein wesentliches Entwicklungsziel herausgestellt. Um neben einem optimalen Druckverlauf auch einen günstigen Energieumsatz zu erreichen ist ein bestmöglicher Aufschlussgrad bei geringstem Einsatz elektrischer Energie erforderlich. Als Ergebnis der Untersuchungen wird festgestellt, dass annähernd der gesamte Saataufschluss durch Reibung und Scherkräfte im ersten Drittel der Maschine erfolgt. Der zugehörige Temperaturverlauf gestaltet sich analog zum Aufschlussgrad. Die Reibungswärme wird im Wesentlichen durch den Zellaufschluss im ersten Drittel des Seiherers freigesetzt und anschließend nur noch wenig gesteigert. Im zweiten und dritten Abschnitt erfolgt dann ein gleichmäßiger Ölabfluss.

ALYMOV und BELOBORODOV [13-19] betrachten bei der Verarbeitung von Sonnenblumensamen auch die Funktion des Seihers unter dem Aspekt des Expulsatabflusses; theoretisch kann ein definiertes Verhältnis zwischen Komprimatporosität und Seiherspaltfläche einen ungehinderten Ölabfluss und einen geringeren Trubanteil bewirken [18]. Die Bedingung eines ungehinderten Expulsatabflusses für die störungsfreie Funktion einer Presse ist nach BREDESON [25] durch grosse Seiherspaltweite bei kleinen Komprimatdrücken und einer Verkleinerung der Seiherspaltweite bei höheren Drücken zu gewährleisten.

SINGER [69] stellt für die Ölsaatenverarbeitung allgemein fest, dass die abgepresste Ölmenge vom Pressdruck, von der inneren Struktur des Komprimats und vom Ölgehalt der Saat abhängig ist. MELNIK [44] untersucht den kontinuierlichen Pressvorgang bei der Verarbeitung von Sonnenblumensamen und weist darauf hin, dass die abgepresste Ölmenge von der inneren Oberfläche des Seihers abhängt und eine Erhöhung der Ölmenge durch eine Vergrößerung der Seiheroberfläche möglich ist. Die abgepresste Ölmenge kann auf die Abmessung des Seihers oder auf die Leistungsaufnahme des Pressenmotors bezogen werden. ZAJIC et al. [78] stellen bei der Verarbeitung von Raps fest, dass zwischen der Stromaufnahme des Pressenmotors und der Pressgutzufuhr, also der Pressenbelastung, eine direkte Proportionalität besteht. Ein höherer Druck hat eine erhöhte Stromaufnahme des Pressenmotors zur Folge [40, 48].

OMOBUWAJO [51] führt bei der Untersuchung des Pressvorgangs an einer Kleinpresse auch eine Massen- und Energiebilanz durch. Anhand von Anfahrkurven wird ein energetisches Gleichgewicht der Presse bereits nach 15 min festgestellt. Eine Drehzahlerhöhung hat nur mässige Auswirkung auf den Temperaturanstieg am Seihers. PRINSLOO et al. [58] stellen bei der Verarbeitung von Sonnenblumensamen ebenfalls fest, dass die Schneckendrehzahl keinen ausgeprägten Einfluss auf die Seihertemperatur hat.

In der Extrudertechnik ist die spezifische mechanische Energieeinleitung (SME) ein wichtiger Parameter zur Beurteilung und Optimierung des Extrusionsvorgangs. Die längst der Schneckenwelle auftretenden mechanischen Kräfte (Druck- und Schergradienten) gehen in das Drehmoment des Antriebs ein. Die SME ist dann die Energie, die bei einer bestimmten Schneckendrehzahl auf ein Masselement pro Zeiteinheit einwirkt [43]:

$$SME = P \cdot n^{-1} = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot n^{-1} \text{ [kWh / kg]} \quad (1-1)$$

1.3.5 Untersuchungen zur Komprimatrheologie von Raps

Ein umfangreicher Überblick über Arbeiten zur Komprimatrheologie ist in der Arbeit von RAß [60] zu finden. Der Autor weist darauf hin, dass beim Trennpressen von Komprimaten aus biogenen Feststoffen die rheologischen Eigenschaften des Materials unter Kompression eine besondere Rolle spielen.

Voraussetzung für eine unabhängige Ermittlung der Einflussgrößen Pressgeometrie und Komprimatrheologie ist die Entkopplung des wechselwirkenden Systems Presse/Komprimat durch Übertragung der zuvor modellierten Kompressionsverhältnisse der Schneckenpresse auf eine deformationsgesteuerte Linearpresse mit definierter Zylinder/Kolben-Geometrie. Durch mehrstufige Linearpressversuche konnten für den biogenen Feststoff "hüllenreduzierte Rapssaat" die für die Funktion einer Seih-Schneckenpresse erforderlichen Komprimateneigenschaften Rückstellkraft und Drainage in Abhängigkeit von Kompressions- und Materialparametern ermittelt werden. Unter einheitlichen Kompressions-Parametern wurden die Materialparameter Hüllengehalt, Wassergehalt, mechanischer Zellaufschluss, Denaturierungsgrad und Presstemperatur und deren Wechselwirkung untereinander untersucht. Die wesentlichen Ergebnisse sind:

- Der Wassergehalt ist bezüglich der rheologischen Eigenschaften des Komprimats als der sensibelste Parameter anzusehen. Geringfügige Veränderungen beeinflussen das Pressverhalten erheblich.
- Der Hüllengehalt prägt die elastischen Eigenschaften des Komprimats wesentlich. Dabei sind die elastischen Eigenschaften der Hüllen nahezu unabhängig vom Wassergehalt.
- Die Erhöhung des Aufschlussgrads führt in Kombination mit einem hohen Wassergehalt bei hüllenreduzierter Rapssaat zu einer Verbesserung der Komprimatdrainage.
- Die Presstemperatur bewirkt zwei konkurrierende Effekte. Bei höheren Temperaturen zeigt die Feststoffmatrix unter Kompression ein zunehmend plastisches Verhalten. Gleichzeitig wird die Viskosität des Öls gesenkt.
- Die Verbesserung der Komprimatdrainage durch eine Denaturierung der Feststoffmatrix ist bei weitem nicht so ausgeprägt wie bei einer Erhöhung des Aufschlussgrads.

1.4 Problemstellung und Zielsetzung

1.4.1 Die Problemstellung

Das Trennpressen biogener Rohstoffe in einer Seiher-Schneckenpresse ist ein komplexer Vorgang, der durch folgende Parameter beeinflusst wird: (1) die Geometrie der Presskammer, (2) die Kraftreaktion des Komprimats im System Seiher/Schnecke, (3) die Kompressionsgeschwindigkeit, (4) die eingeleitete mechanische Energie und (5) die rheologischen Eigenschaften des Komprimats. Die Untersuchung des kontinuierlichen Pressvorgangs erfordert somit die Berücksichtigung unterschiedlicher Aspekte:

- (1) Die Zuordnung geometrischer Einflussgrößen auf den Pressvorgang ist eine notwendige Bedingung für experimentelle Untersuchungen, welche durch die komplexe Pressraumgeometrie technischer Pressen erschwert wird. Die Schneckenausrüstung einer geeigneten Versuchspresse erfordert daher eine definierte Geometrie. Der Seiher ist im Sinne einer gleichmäßigen Verteilung der Tangentialreibung über den Umfang zu gestalten.
- (2) Die Kraftreaktion des Komprimats, die als Folge der zunehmenden Kompression in Förderrichtung stetig ansteigt, ist durch lokale Druckschwankungen über den Seiherumfang charakterisiert. Durch eine geeignete Messmethode ist der Radialdruck entlang des Seiher zu erfassen.
- (3) Die Kompressionsgeschwindigkeit wird durch eine helixförmige Bewegung des Materials im Schneckenkanal beeinflusst. Es ist zu überprüfen, ob eine Methode zur Verweilzeitmessung verwendbar ist um Informationen über die Komprimatbewegung während des Pressens liefern kann; Untersuchungen zur Verweilzeitmessung an Seiher-Schneckenpressen konnten in der Literatur nicht nachgewiesen werden.
- (4) Die Einleitung mechanischer Energie zur Verrichtung der Pressarbeit erfolgt über Druck- und Scherkräfte. Die zum Teil in Reibungswärme umgesetzte mechanische Energie bewirkt eine Temperaturverteilung im Pressraum. Die aus der Extrudertechnik bekannte spezifische mechanische Energieeinleitung SME wird in der Literatur im Zusammenhang mit Seiher-Schneckenpressen nicht erwähnt. Im Zusammenhang mit der SME ist eine Bilanzierung der ein- und ausgehenden Massenströme notwendig.
- (5) Die Bestimmung des rheologischen Komprimatverhaltens bedingt eine geeignete Transformation zwischen Schnecken- und Linear-Experiment.

1.4.2 Die Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die experimentelle Untersuchung des kontinuierlichen Trennpressens biogener Feststoffe in Schneckengeometrien. Eine geeignete Versuchsanordnung stellt eine kontinuierlich arbeitende Seiher-Schneckenpresse zu Verarbeitung von Ölsaaten mit variabler Pressraumgeometrie dar. Die im System Seiher/Schnecke relevanten Parameter werden im Arbeitsmodell in die "äußeren" Größen Geometrie des Pressraums und Drehzahl der Schneckenwelle sowie in die Komprimatreaktion als "innere" Größe unterteilt.

Die Geometrie des Pressraums wird durch die Geometrie der Schneckenhelix, die Geometrie des Schneckenkerns und der Seiherkonfiguration charakterisiert. In der Literatur sind experimentelle Untersuchungen an Seiher-Schneckenpressen unter Variation von Geometrieparametern kaum zu finden. Eine differenzierte Betrachtung zum Einfluss von Helix- und Kerngeometrie ist nicht üblich. Um die komplexen Vorgänge in der Presskammer systematisch analysieren und modellieren zu können, sind aber grundlegende Untersuchungen zur Funktion der Schneckengeometrie erforderlich.

Die Komprimatreaktion umfasst die Kraftreaktion und die Bewegung des Komprimats in der Presskammer. Während die experimentelle Untersuchung der Kraftreaktion über die radialen Pressdrücke standardmäßig durchgeführt wird, sind in der Literatur Berichte zur Bestimmung der Komprimatbewegung in der Presskammer kaum zu finden. Mit der in der Extrudertechnik üblichen Bestimmung des Verweilzeitverhaltens ist eine Aussage über die axiale Komprimatbewegung möglich, mit einer sukzessiven Verweilzeitmessung könnten zudem auch Änderungen der Komprimatbewegung über die Länge der Presskammer erfasst werden.

Die spezifische mechanische Energieeinleitung (SME) zur Verrichtung von Pressarbeit ist in der Extrudertechnik eine der wichtigsten Prozessgrößen. Mit der Übertragung dieser Kennzahl auf das Pressergebnis in einer Seiher-Schneckenpresse ist eine Aussage über den Energieaufwand des Trennpressens bezogen auf die ein- und ausgehenden Massenströme möglich.

Die Untersuchung der Komprimatrheologie erfordert eine Entkopplung des Systems Presse/Komprimat durch eine Transformation des Pressregimes aus der Schneckenpresse auf die Linearpresse. Mit den in den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnissen ist das unter vereinfachenden Annahmen aufgestellte Transformationsmodell zu überprüfen.

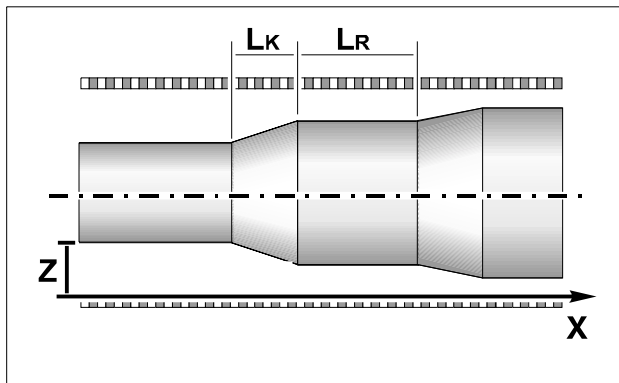
1.5 Das Arbeitsmodell

1.5.1 Die geometrischen Bedingungen in der Presskammer

Die geometrischen Bedingungen in der Presskammer werden durch die Geometrie der Schneckenwelle und der inneren Oberfläche des Seihers bestimmt. Die komplexe Geometrie der Schneckenwelle ist durch eine Abfolge von Pressstufen charakterisiert, die jeweils durch eine Kombination aus Förder- und Kompressionselement gebildet werden. Die Funktion der Schneckenelemente wird durch die Geometrie der Schneckenhelix und des Schneckenkerns bestimmt. Die Geometrie der inneren Oberfläche des Seihers ist durch seine Länge und den Innendurchmesser definiert. Die Funktion der Innenfläche als Reibpartner für das Komprimat und als Drainagefläche für das Expulsat kann durch die Seiherbelegung beeinflusst werden.

In Abb. 1-6 ist die Geometrie der Schneckenwelle als Kombination aus Kern- und Helixgeometrie abgebildet. Die Geometrie des Schneckenkerns ist durch eine Zunahme des Kerndurchmessers d in Förderrichtung x charakterisiert. Bei einem gleichbleibenden Innendurchmesser des Seihers D_S verringert sich die Komprimathöhe z . Der Kerngeometrie kommt damit die Funktion der Reduktion des freien Volumens in Förderrichtung zu. Die Zunahme des Kerns erfolgt in der Regel stufenweise durch eine entsprechende Kombination von konischen Elementen mit einer Zunahme des Kerndurchmessers und der zylindrischen Elementen mit einem konstanten Kerndurchmesser. Gleich lange konische Kompressionsabschnitte L_K und zylindrische Relaxationsabschnitte L_R erleichtern in experimentellen Untersuchungen die Zuordnung des Einflusses der Kerngeometrie auf das Pressergebnis. Zugunsten einer stufenförmigen Kompression über die Seiherlänge wird auf eine Beeinflussung des Pressdrucks über eine Enddrossel am Mundstück verzichtet.

Die Geometrie der Schneckenhelix wird durch einen um den Kern gewundenen Steg mit einem Aussendurchmesser D_H gebildet; der innere Durchmesser des Stegs entspricht dem Durchmesser des Schneckenkerns d (Abb. 1-6). Die Helix ist durch den Steigungswinkel γ charakterisiert; eine Vergrößerung von γ bewirkt eine Erhöhung des Vorschubs in x -Richtung. Der Helixgeometrie kommt damit die Funktion des Materialvorschubs in Förderrichtung zu. Die Zuordnung des Einflusses der Helixgeometrie in experimentellen Untersuchungen wird durch einen konstanten Steigungswinkel erleichtert; im Sinne einer gleichmäßigen Materialförderung ist eine ununterbrochene Windung über die gesamte Schneckenlänge zu bevorzugen.

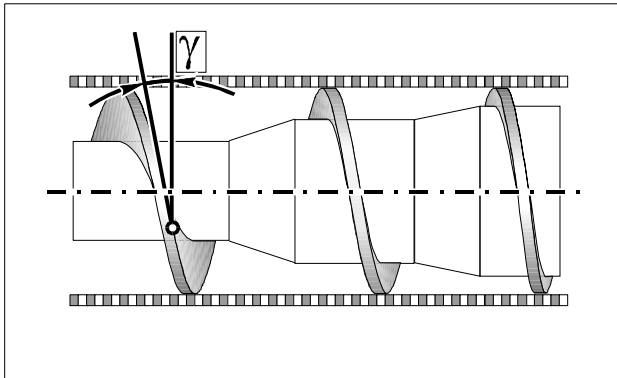


Kerngeometrie:

- Kompressionslänge L_K
- Relaxationslänge L_R

Z = Abstand Kern/Seiher

Kombination von Kern- und Helixgeometrie



Helixgeometrie:

- Steigungswinkel γ

Abb. 1-6: Die Geometrie der Schneckenwelle als Kombination aus Kern- und Helixgeometrie

Die Abfolge von Kompressions- und Relaxationsabschnitten der Schneckenwelle wird technisch durch die Kombination einzelner Schneckenelemente realisiert, die auf einem gemeinsamen Dorn verspannt werden. Die Kombination eines zylindrischen Förderelements mit einem konischen Kompressionselement bildet eine Pressstufe.

Als Kompressionselement soll im Folgenden ein Schneckenelement ohne Schneckengang bezeichnet werden, wie es in Abb. 1-7 dargestellt ist. Die Abnahme der Komprimathöhe z um den Betrag Δz erfolgt innerhalb eines Kompressionsabschnitts K , mit der Länge L_K . An den Kompressionsabschnitt kann sich ein Relaxationsabschnitt R mit einer konstanten Pressraumhöhe z und einer Relaxationslänge L_R anschließen. Die Verteilung zwischen L_K und L_R innerhalb eines Kompressionselements ist somit durch ein Kompressions-Längenverhältnis κ beschreibbar. Für den Fall einer reinen Kompressionsstufe ist $\kappa = 1$, bei einem zusätzlichen Relaxationsanteil wird $\kappa < 1$.

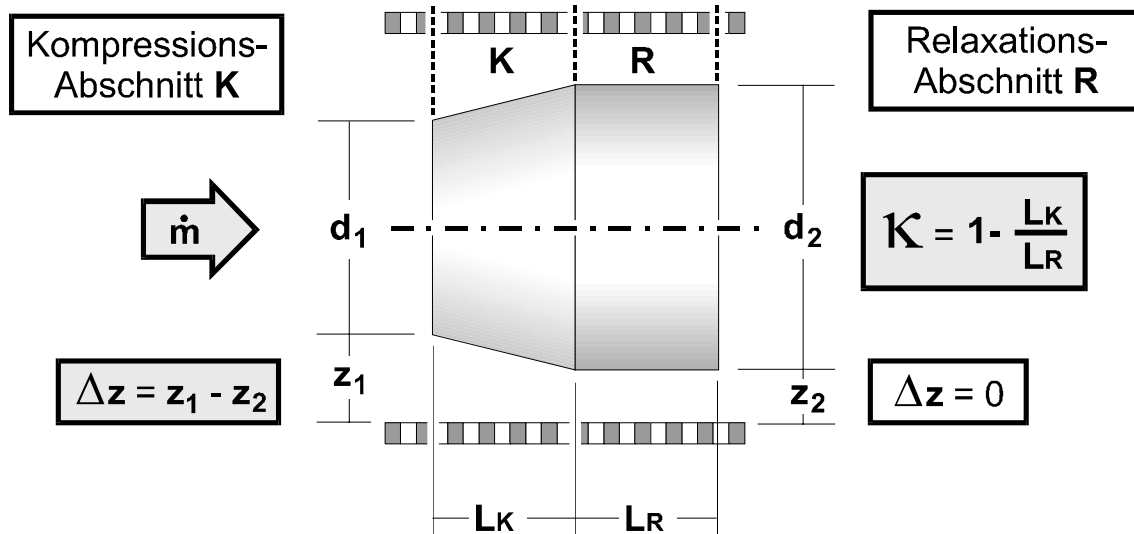


Abb. 1-7: Kompressionselement, Aufbau und Funktion

Als Förderelement soll im Folgenden ein Schneckenelement mit Schneckengang bezeichnet werden, wie es in Abb. 1-8 dargestellt ist. Die Steigung des Schneckengangs ist über den Steigungswinkel γ beschreibbar. Rotiert die Schneckenhelix mit einer Winkelgeschwindigkeit ω um die Mittelachse, schiebt sie in Abhängigkeit vom Radius R mit der axialen Vorschubgeschwindigkeit u_{ax} in x-Richtung. Durch die Kombination von Helix- und Kerngeometrie wird das Spektrum des Kompression-Längenverhältnisses innerhalb der Förderlänge L_F auf Grund der technischen Fertigung auf die beiden Grenzfälle $\kappa = 1$ (Abb. 1-8 A) und $\kappa = 0$ (Abb. 1-8 B) beschränkt.

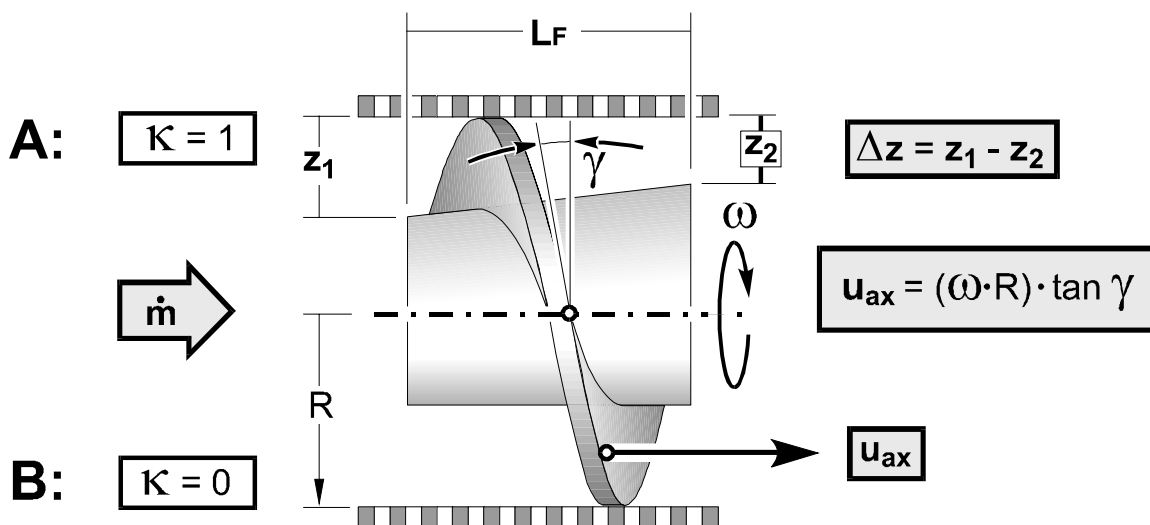


Abb. 1-8: Förderelement, Aufbau und Funktion

Die Abnahme des Steigungswinkels γ über die Länge der Schneckenwelle führt zu einer Helixgeometrie mit degressiver Steigung des Schneckenstegs wie sie in Abb. 1-9 dargestellt ist.

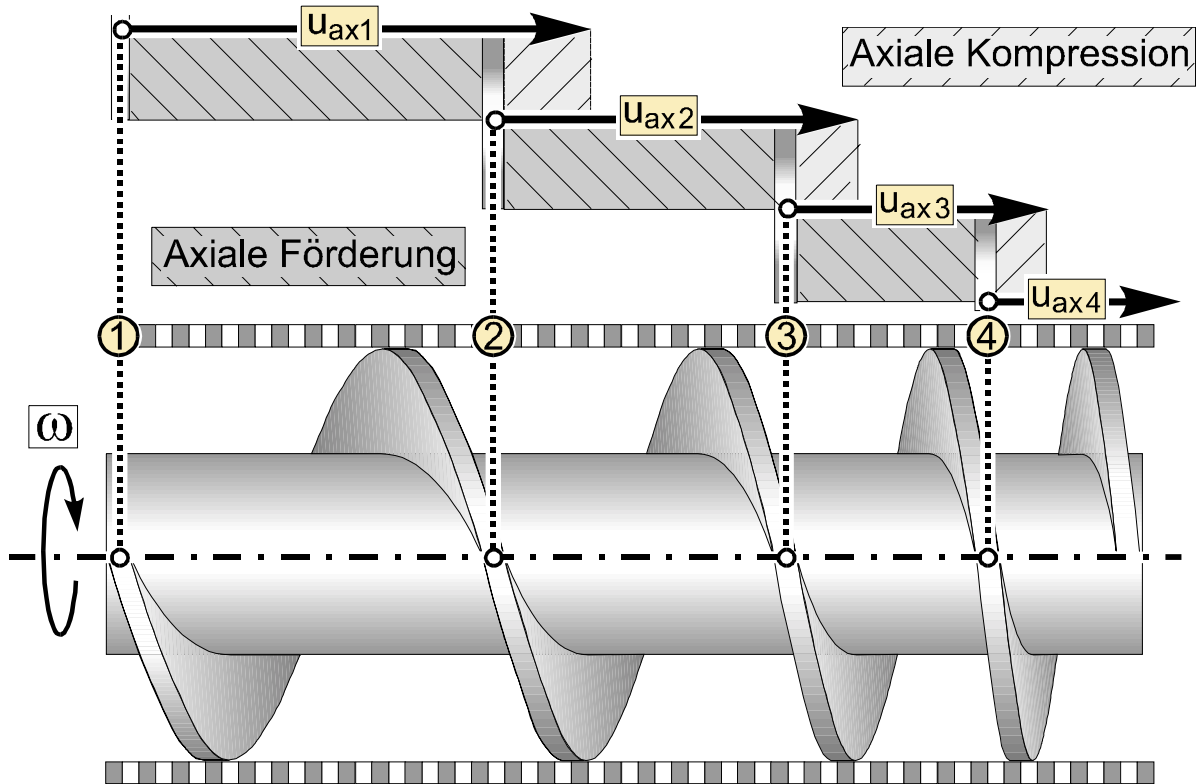


Abb. 1-9: Helixgeometrie mit degressiver Steigung des Schneckenstegs

Die in x-Richtung verlaufende axiale Vorschubgeschwindigkeit u_{ax} verändert sich an jeder Position des Schneckenstegs. Zwei in Förderrichtung hintereinander liegende Punkte auf dem Schneckensteg sind somit durch zwei unterschiedliche Vorschubgeschwindigkeiten gekennzeichnet. Ein vom Schneckensteg in Punkt 1 mit der Geschwindigkeit u_{ax1} angeschobenes Volumenelement wird in Förderrichtung durch den Schneckensteg in Punkt 2 mit der langsameren Vorschubgeschwindigkeit u_{ax2} gebremst. Unter der Annahme einer rein axialen Komprimatbewegung wird sich auf Grund der sich verändernden Bewegungsverhältnisse neben einer axialen Förderung in Abhängigkeit von der Abnahme des Steigungswinkels auch eine axiale Kompression einstellen. Bei technischen Pressen ist eine Kombination von in Förderrichtung progressivem Kerndurchmesser und degressiver Steigung des Schneckenstegs Stand der Technik. Die Kombination aus radialer und axialer Volumenreduktion erschwert aber die eindeutige Zuweisung geometrischer Einflüsse auf das Pressergebnis.

Die Länge des Seihers beeinflusst die Geometrie der Presskammer in zweierlei Hinsicht. Erstens bedingt eine Verlängerung des Seihers eine Verlängerung der Schneckenwelle, zweitens bewirkt sie bei konstantem Innendurchmesser eine Vergrößerung der Drainagefläche für das Expulsat und der Reibfläche für das Komprimat. Unter der Voraussetzung einer gleichbleibenden Länge für die Kompressions- und Förderelemente erhöht sich bei einer Seiherverlängerung die Anzahl an Pressstufen der Schneckenwelle. Jede Pressstufe wird von einem Abschnitt des Seihers umschlossen, der im Folgenden als Seiherfeld bezeichnet wird. Seiherfeld und Pressstufe bilden eine feste Einheit im System Seier/Schnecke. In jedem Seiherfeld können sich die Reibungsbedingungen und die Drainage für das Komprimat und das Expulsat verändern. Die Funktion der inneren Seiheroberfläche als Reibfläche für das Komprimat wird durch die Anstellwinkel σ der Seiherbelegung bestimmt. Das Prinzip ist in Abb. 1-10 dargestellt.

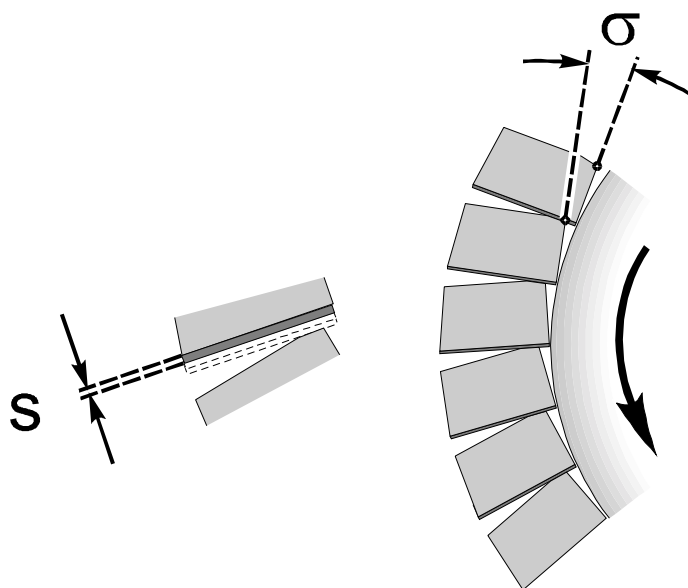


Abb. 1-10: Teilansichten des Stabseihers im Schnitt:

Veränderung der Reibungsbedingungen durch den Anstellwinkel σ ,
Veränderung der Drainage durch die Spalte S

Durch eine Vergrößerung von σ werden die Reibungsbedingungen an der Innenfläche des Seihers erhöht. Auf Abstreifplatten, die in technischen Pressen zusätzlich zur Umfangsreibung die Rotation des Komprimats mindern sollen, wird bei den experimentellen Untersuchungen zu Gunsten einer gleichmäßigen Verteilung der Tangentialreibung am Seihenumfang verzichtet. Die Drainage des Seihers wird durch die Spaltweite S bestimmt.

1.5.2 Die Bewegung des Komprimats in der Presskammer

Die Bewegungsverhältnisse in der Presskammer bestimmen entscheidend den Pressvorgang und in der Folge das Pressergebnis. In Abb. 1-11 ist der Abschnitt einer Schneckenwelle dargestellt. Die Ursache für eine Komprimatbewegung ist die Drehung der Schneckenwelle. Die mit der Geschwindigkeit u_{rot} rotierende Schneckenwelle ist charakterisiert durch den Steigungswinkel γ , der die axiale Bewegung eines in Umfangsrichtung stationären Punktes mit der Geschwindigkeit u_{ax} bewirkt. Damit kann die Bewegung der Schnecke durch die "äußeren Größen" Geometrie und Drehzahl der Welle beschrieben werden.

Das Komprimat reagiert auf diese "äußeren Größen" mit einer Bewegung, die durch zwei sich überlagernde Geschwindigkeitskomponenten beschreibbar ist: Die Drehung des Materials mit der Geschwindigkeit v_{rot} und den Vorschub in axialer Richtung mit der Geschwindigkeit v_{ax} , wobei sich die Anteile in Abhängigkeit von verschiedenen Prozess- und Maschinenparametern verändern können. Aus der Überlagerung der Geschwindigkeitskomponenten ergibt sich eine resultierende helixförmige Bewegung (Abb. 1-11).

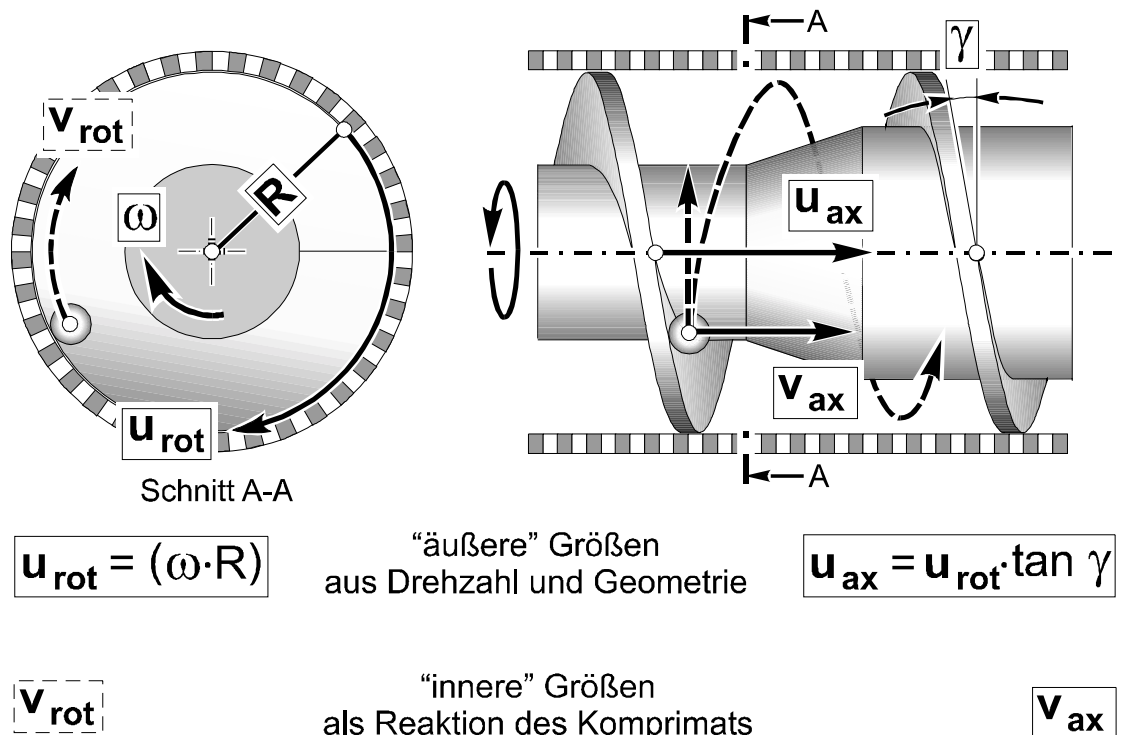


Abb. 1-11: Die Bewegungsverhältnisse im System Seiher/Schnecke

Werden die verschiedenen Geschwindigkeitskomponenten in einem Geschwindigkeiten-Plan in der Ebene abgewickelt, wie er in Abb. 1-12 dargestellt ist, sind die Bewegungsverhältnisse deutlicher zu erkennen. Mit einer Quantifizierung der Rotationsgeschwindigkeit v_{rot} des Komprimats kann eine Aussage über den Förderwinkel Φ und die resultierende Förderrichtung gemacht werden. Eine hinreichend genaue Bestimmung von v_{rot} ist aber kaum möglich. Mit der Kenntnis des vom Komprimat axial zurückgelegten Wegs und der dafür benötigten Zeit kann aber eine Aussage über die axiale Vorschubgeschwindigkeit v_{ax} gemacht werden. Die axiale Wegstrecke ergibt sich aus den geometrischen Abmessungen der Seiherkammer. Die benötigte Zeit zum Zurücklegen der Wegstrecke kann mit der Methode der Verweilzeitmessung bestimmt werden.

Aus dem Verhältnis von axialer Vorschubgeschwindigkeit der Schneckenwelle zur axialen Geschwindigkeit des Komprimats kann ein axialer Förderwirkungsgrad α definiert werden. Bei $\alpha = 1$ wäre theoretisch die Rotationsgeschwindigkeit des Komprimats $v_{\text{rot}} = 0$ und der Schlupf zwischen Schneckenwelle und Komprimat maximal.

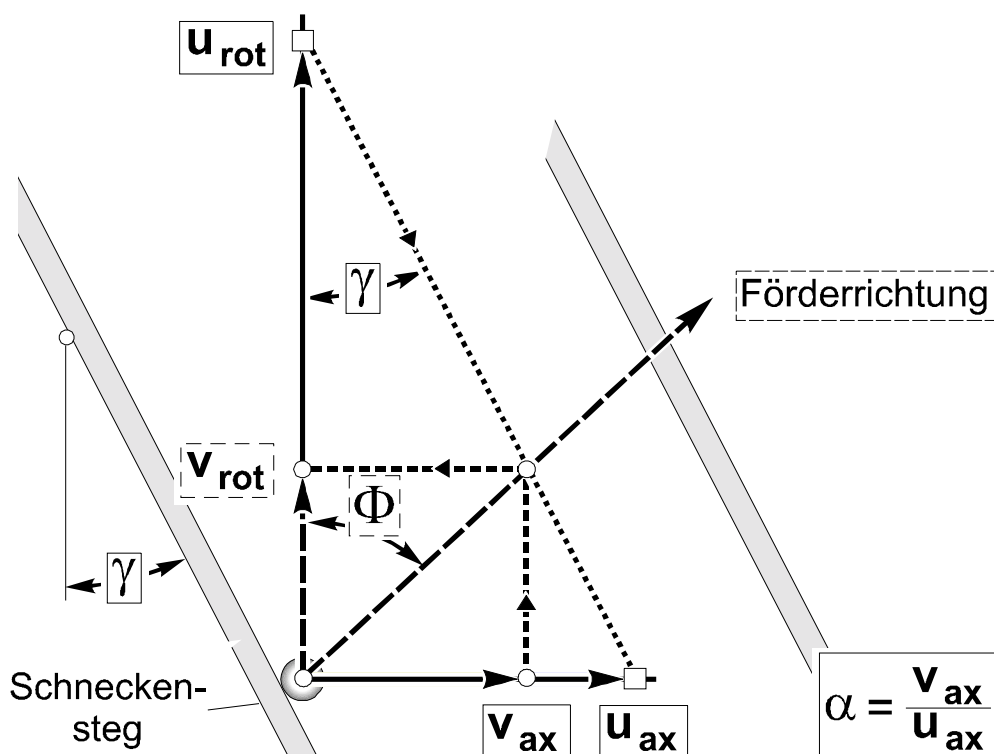


Abb. 1-12: Geschwindigkeitenplan für Schnecken- und Komprimatbewegung

1.5.3 Die Kraftreaktion des Komprimats

Über den rotierenden Schneckensteg wird mechanisch Energie in das Komprimat eingeleitet. Das Prinzip der Energieeinleitung ist in Abb. 1-13 dargestellt. Infolge des Steigungswinkels γ der Schneckenhelix kann die eingeleitete Energie E in eine axial wirkende Komponente E_{ax} und eine in Rotationsrichtung wirkende Komponente E_{rot} aufgeteilt werden.

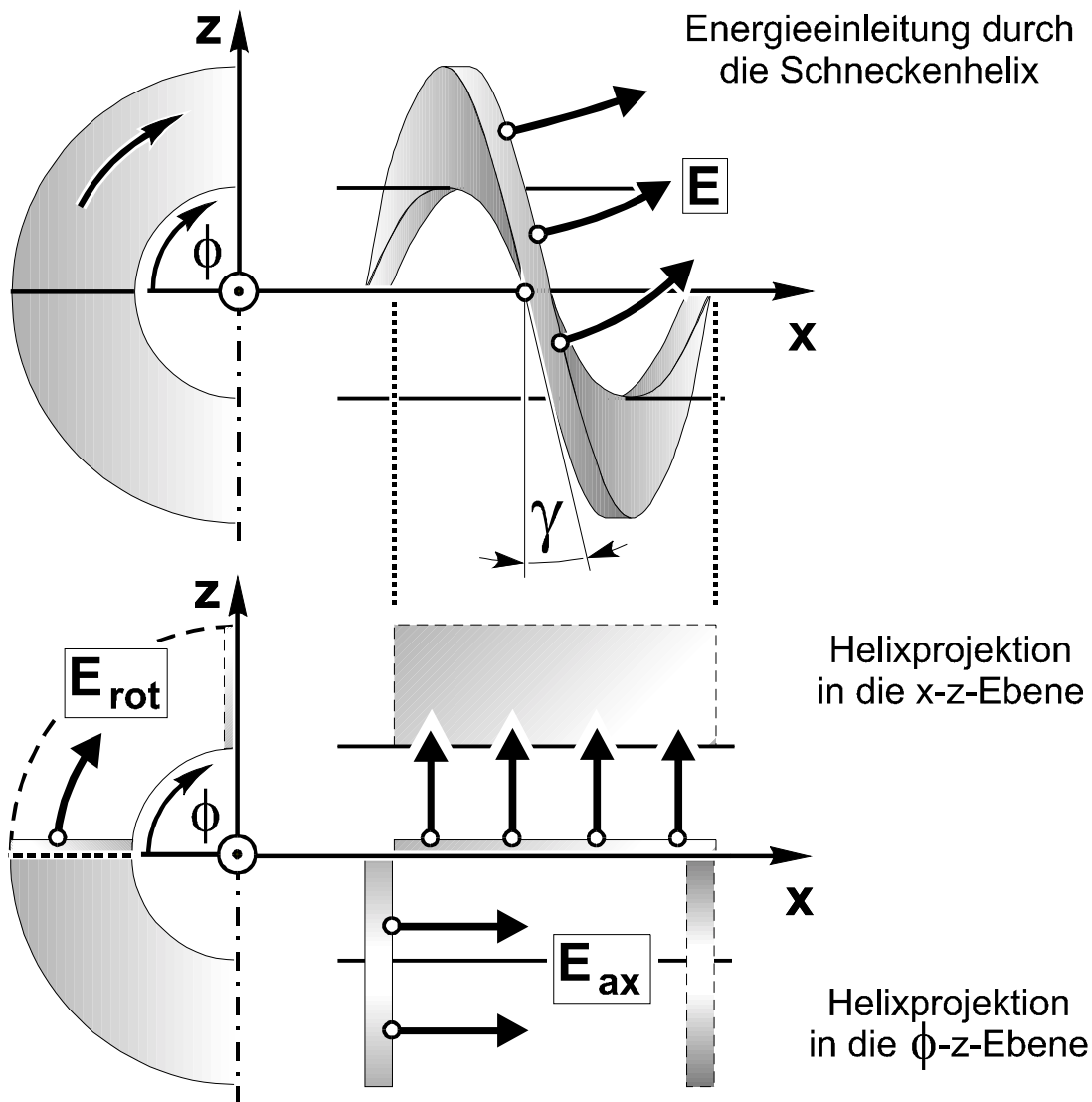


Abb. 1-13: Energieeinleitung durch die Schneckenhelix

Die sich einstellende Kraftreaktion des Komprimats ist in Abb. 1-14 dargestellt. Unter der Voraussetzung, dass das Komprimat Kräfte übertragen kann, werden durch E_{rot} Schubspannungen in die Umfangsrichtung übertragen, die von den Reibungsbedingungen an der rotierenden Schnecke

und am statischen Seiher beeinflusst werden. E_{ax} überträgt Kräfte in axialer Richtung, wobei das Material gegen die axialen Reibwiderstände an Seiher und Schnecke in den sich verengenden Pressraum transportiert wird. Die in Abb. 1-14 dargestellte axiale Kraft $-F_{ax}$ wirkt dabei in Richtung der schiebenden Flanke des Schneckenstegs, die Kraft $+F_{ax}$ wirkt in Richtung des sich verengenden Pressraums und der ziehenden Stegflanke. Wird ein gedachtes Volumenelement axial in den sich verengenden Pressraum transportiert, wird das Material zwischen Seiher und Schneckenkern radial komprimiert und die radial wirkenden Kräfte $\pm F_{rad}$ übertragen.

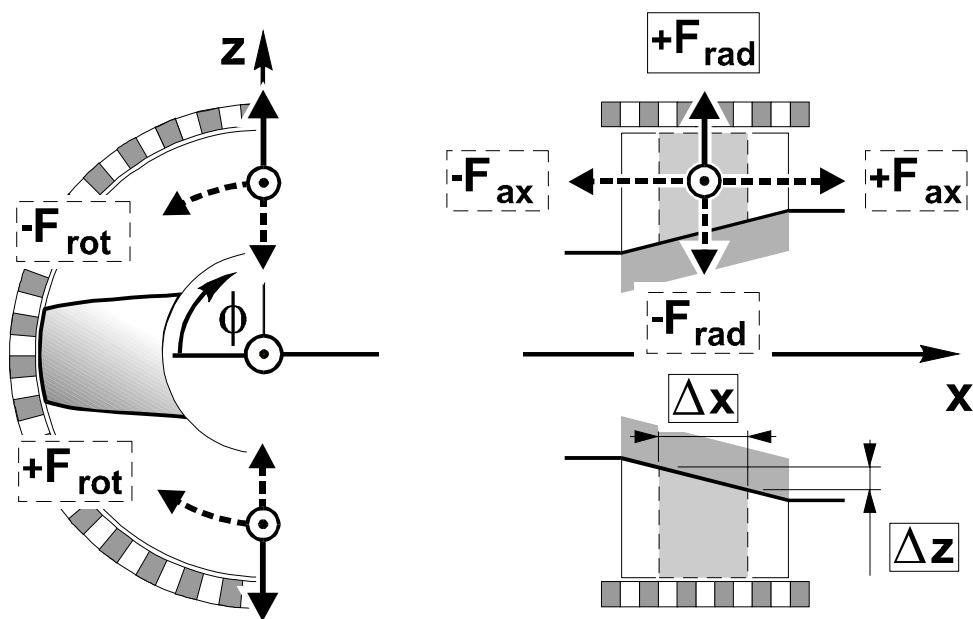


Abb. 1-14: Kraftreaktion des Komprimats

Bezogen auf eine definierte Fläche kann die orthogonal auf die Seiherinnenfläche wirkende Kraft im Komprimat $+F_{rad}$ als radialer Pressdruck gemessen werden.

Die gemessenen Radialdrücke sind durch einen periodisch schwankenden Verlauf charakterisiert. Diese periodischen Schwankungen stehen mit der rotierenden Schneckenwelle, insbesondere mit der Position des Schneckenstegs im Bereich der Druckmessstelle in einem zeitlichen und einem örtlichen Zusammenhang. Durch die lineare Darstellung der Druckmesswerte einer Messstelle über der Zeit ist die örtliche Abhängigkeit zwischen Kraftreaktion und Schneckenengeometrie nur schwer zu erkennen. In Abb. 1-15 ist das Prinzip zur Messung der radialen Pressdrücke und daraus folgend zur Bestimmung der Kraftreaktion des Komprimats dargestellt. Werden die gemessenen

Drücke in Polarkoordinaten über den Umfang der Schneckenwelle dargestellt, ist die örtliche Abhängigkeit deutlich erkennbar.

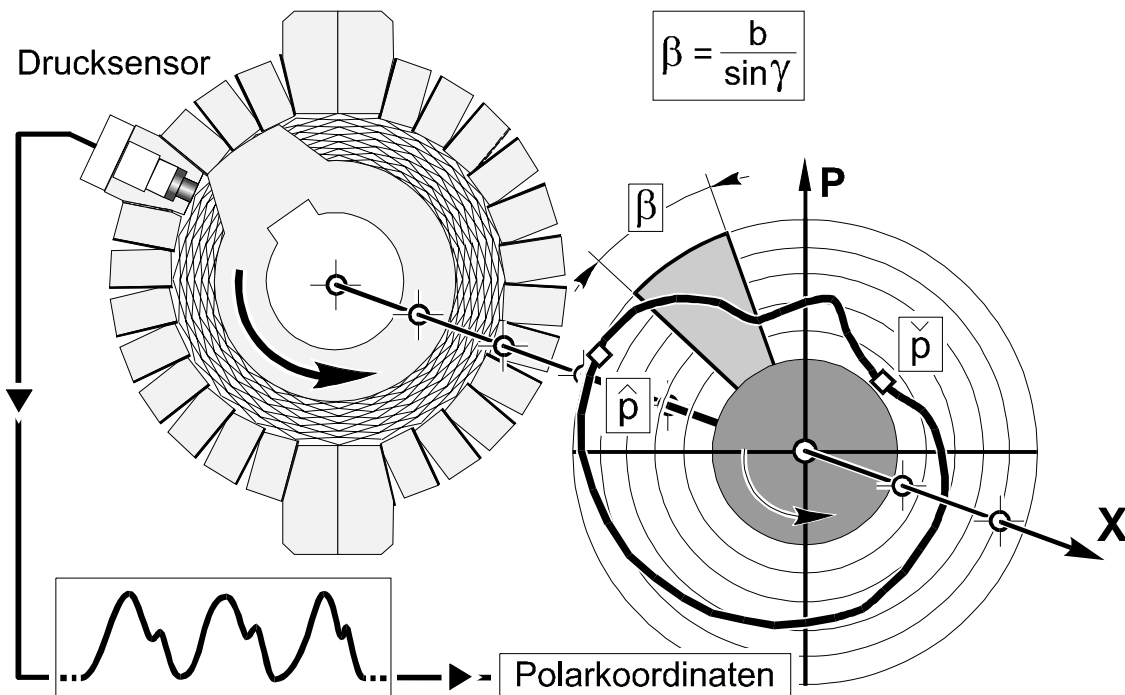


Abb. 1-15: Messung der radialen Pressdrücke zur Bestimmung der Kraftreaktion

Die Bogenlänge β ergibt sich aus dem Verhältnis von der Breite des Schneckenstegs b dividiert durch dem Sinus des Steigungswinkel γ . Mit β kann im Polardiagramm der Bereich beschrieben werden, in dem die Radialdruckmessung durch den rotierenden Schneckensteg beeinflusst wird. Das sich einstellende Druckprofil ist durch einen Maximaldruck \hat{p}_i vor der schiebenden Flanke des Schneckenstegs gekennzeichnet, der sich über den Wellenumfang auf einen Minimaldruck \check{p}_i hinter der ziehenden Flanke abbaut. Bei einer Druckmessung über die Länge der Presskammer wird an jeder diskreten Messstelle ein solches Druckprofil aufgenommen. Für eine korrekte Darstellung der Drücke über die Längsachse der Presskammer muss an jeder Messstelle der Minimal- und Maximaldruck angegeben werden.

1.5.4 Die Massen- und Energiebilanzierung

Die Massen- und Energiebilanz des kontinuierlichen Pressvorgangs wird durch die "äußeren Größen" der Presse und durch die "inneren Größen" der Komprimateneigenschaften und -reaktionen bestimmt.

Die ein- und ausgehenden Massenströme ergeben sich aus den sich einstellenden Bewegungsverhältnissen in der Presskammer. Insbesondere werden diese von den Komprimateneigenschaften und dem Verhalten unter Kompression beeinflusst. Für die Aufstellung einer Massenbilanz ist es notwendig Phasen und Komponenten der Massenströme nach Tab. 1-1 zu unterscheiden.

Tab. 1-1: Bezeichnung und Symbole für Phasen, Komponenten, Massen und Zusammensetzungen

Symbolik der Phasen	A K E S	= Abgeber (ungepresste Saat) = Komprimat (Saat unter Kompression) = Expulsat (Pressöl und Trub) = Schilfer (ausgeworfener Presskuchen)
Symbolik der Komponenten	F C W	= inerter Feststoff = Zielkomponente (Öl) = Begleitkomponente (z.B. Wasser)
Symbolik der Massen	FA, CA, WA FS, CS, WS CE, FE	= Inertstoffmasse, Ziel- und Begleitkomponente im Abgeber = Inertstoffmasse, Ziel- und Begleitkomponente im Schilfer = Inertstoffmasse und Zielkomponente im Expulsat
Zusammensetzung	X x	Beladung, auf Inertstoffmasse bezogen Gehalt auf Gesamtmasse bezogen

Die Verrichtung von Pressarbeit zur Trennung einer flüssigen von einer festen Phase erfordert die Aufwendung von Energie, die über den Schneckensteg in das System, insbesondere das Komprimat eingeleitet werden muss. Der Einfluss der Presse auf den Energiebedarf ergibt sich aus dem Arbeitsprinzip (Druck und/oder Scherung), der Bauart und Konstruktion sowie aus der Betriebsweise (Drehzahl). Die kombinierte Beanspruchung aus Kompression und Scherung bewirkt eine Gutumwälzung und als Folge eine Erhöhung des Abpressgrades; die zum Teil erheblichen Kräfte erfordern aber einen hohen Energieaufwand. Durch die Kompression des Materials und der

Reibung am Seiherr und an der Schnecke wird ein Teil der mechanischen Energie in Wärme umgewandelt. Diese Reibungswärme beeinflusst wiederum die mechanischen und rheologischen Eigenschaften des Komprimats. Bezüglich der durchgesetzten Massen ist die spezifische mechanische Energieeinleitung (SME) ein wichtiges Maß für die Energiebilanzierung und damit ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung des Pressergebnisses. Die SME kann anteilig auf das abgepresste Expulsat, den teilentölkten Pressschilfer oder integral auf die durchgesetzte Saat bezogen werden.

1.5.5 Die rheologischen Eigenschaften des Komprimats

Die Untersuchung der rheologischen und mechanischen Eigenschaften des Komprimats erfordert eine Entkopplung der Wechselwirkungen zwischen Material und Schneckenpresse. Dazu sind die Kompressionsverhältnisse aus dem kontinuierlichen Pressvorgang auf ein Linear-Experiment mit definierter Zylinder/Kolben-Geometrie zu übertragen.

Die Schneckengeometrie stellt eine Abfolge von Kompressions- und Relaxations-Elementen dar. Eine Transformation zwischen Schnecken- und Linear-Experiment erfordert eine Simulation dieses mehrstufigen Pressvorgangs. Dabei ist zum einen die Geometrie der Presskammer und zum anderen die Bewegung des Komprimats zu berücksichtigen.

In einer ersten Näherung wird die Kerngeometrie, d.h. der Abstand vom Seiherr zum Schneckenkern auf die Linearpresse (Zylinder/Kolben-Geometrie) übertragen. Unter der vereinfachenden Annahme einer konstanten axialen Vorschubgeschwindigkeit des Komprimats ergeben sich bei geometrisch gleich langen Kompressions- und Relaxationselementen der Schnecke auch zeitlich gleich lange Kompressions- und Relaxationsphasen.

In der Arbeit von Raß [60] wurde in Vorversuchen eine pauschale Höhenkorrektur zur Einhaltung eines realistischen Druckniveaus in einer Schneckenpresse ermittelt. Bei einer Kompression in der Linearpresse auf die gleiche Komprimathöhe z wie in der Schneckenmaschine würde das Material stärker komprimiert, da es auf Grund der festen Systemgrenzen nicht radial ausweichen kann. Eine realistische Korrektur der Komprimathöhen in der Linearpresse kann nur unter Kenntnis der wahren Komprimatbewegung über die ganze Schneckenlänge vorgenommen werden, die aus der Interaktion von Schneckengeometrie und Komprimateneigenschaften resultiert.

2 Versuchstechnik

Zur Untersuchung des kontinuierlichen Pressvorgangs in einer Schneckenpresse unter den in der Zielsetzung dargelegten Aspekte ist eine Versuchstechnik erforderlich, wie sie im Folgenden beschrieben wird.

2.1 Das Versuchsmaterial

Als **Versuchsmaterial** wurde geschälte Rapssaat (Winterraps, Brassica napus, Doppel-Null-Qualität) eingesetzt. Auf Grund des umfangreichen mehrjährigen Versuchs-programms musste Material aus unterschiedlichen Ernten verwendet werden. Die Saat wurde in einem Abstand von drei bis vier Monaten in Chargengrößen von 0,6 bis 0,7 t aus dem Tagessilo eines industriellen Ölmühlenbetriebs bezogen ($xW = 7 - 8\%$, $XC = 0,89 - 0,94$).

Die Durchführung eines Schnecken-Experiments erfordert einen Material-aufwand von ca. 80 bis 100 kg Versuchsmaterial. Zur Bereitstellung dieser Menge an Versuchsmaterial mit reproduzierbaren Eigenschaften sind einfache und praktikable Methoden zur Materialkonditionierung angewendet worden.

Die **Reinigung des Versuchsmaterials** erfolgt durch eine Klassierung auf einer Allgaier-Taumelsiebmaschine (Typ ATS 600/3). Dabei werden Grob- und Feinbesatz sowie Kümmerkörner entfernt und nur die klassierte Saat ($\varnothing 1,6 - 2,5$ mm) weiterverwendet.

Das **Schälverfahren** zur Herstellung von hüllenreduzierter Rapssaat wurde von SCHNEIDER [66, 67] vorgestellt und umfasst die folgenden Schritte:

- Die **Trocknung der klassierten Saat** ist für eine optimale Schälung erforderlich. Durch eine mehrwöchige offene Lagerung bei konstanten Umgebungsbedingungen (25 °C) wird die Saatsäure auf den gewünschten Wert reduziert; zur Produktschonung (Denaturierung, Enzymaktivierung) wird eine thermische Trocknung vermieden. Die getrocknete Saat wird bis zur Weiterverarbeitung in luftdicht schließenden Kunststoff-Fässern gelagert.
- Das **Brechen der getrockneten Saat** erfolgt auf einem Walzwerk der Firma Bühler-Miag (Variostuhl, Glattwalzen $\varnothing 315$ mm) in einem Walzenspalt von 1,0 mm. Die Saat wird dabei mechanisch aufgeschlossen und in ein Bruchgemisch aus Kern- und Hüllenfragmenten zerlegt.

- Das **Klassieren des Bruchgemischs** erfolgt auf einer Allgaier-Taumelsiebmaschine (Typ ATS 600/3) in vier Fraktionen. Der Feinbruch Saat ($\varnothing < 0,4$ mm) und der Anbruch ($\varnothing > 1,6$ mm) werden verworfen. Der Nutzbruch ($\varnothing 0,4 - 1,6$ mm) wird weiterverwendet.
- Die **Sichtung des Nutzbruchs**, d.h. die Trennung in Hüllen und Kernfleisch, erfolgt durch eine Windsicht-Sortierung auf einem Labor-Zickzacksichter. Die Hüllenfraktion mit geringem Anteil an Kernfleisch-Feinbruch wird im Overflow durch einen Zyklon abgeschieden; das Kernfleisch mit Resten an Hüllenfragmenten sammelt sich im Underflow. Die Lagerung des Schälrapses erfolgt in verschlossenen Behältern bei Raumtemperatur.

Die **Flockierung des Kernfleischs** erfordert eine Materialnässe von ca. 7 %, die über eine gravimetrische Massenbilanz durch Aufsprühen von Wasser bei ständiger Durchmischung der Saat eingestellt wird. Anschließend wird das befeuchtete Material für mindestens 24 Stunden bei Raumtemperatur in Kunststoff-Fässern vergleichmäßiggt. Die Flockierung des Materials erfolgt auf einem Walzwerk (Bühler-Miag, Variostuhl, Glattwalzen $\varnothing 315$ mm) bei einem Walzenspalt von 0,1 mm und einem Schlupf von $\Delta n = 20 \text{ min}^{-1}$ ($n_1/n_2 = 380/400 \text{ min}^{-1}$). Dabei wird der Aufschluss der Saat erhöht.

Die **hydrothermische Konditionierung des Versuchsmaterials** erfolgt in einer mehrstufigen Wärmepfanne, bestehend aus einer Antriebseinheit als Basis, auf die bis zu zehn Böden aufgesetzt werden können ($\varnothing 600$ mm). Die Böden sind jeweils mit Misch- und Rührorganen bestückt. Wand- und Bodentemperatur jedes Bodens sind mit Heizelementen ausgestattet und können separat temperaturgesteuert werden. In jeden Boden kann heiße und kalte Frischluft oder Wasserdampf eingeleitet und Abluft oder Brüden abgezogen werden. Im kontinuierlichen Betrieb ist eine Konditionierung von max. 50 kg Material zur ununterbrochenen Versorgung der Schneckenpresse realisierbar.

2.2 Die Charakterisierung des Versuchsmaterials

Die Bestimmung des **Fett- und Hüllengehalts** erfolgt nach der DGF-Einheitsmethode (DGF B-I 5 (87)). Analysiert wurde der Fettgehalt der ganzen Saat, der Hüllen und des Kernfleisches. Die Analysen der verwendeten Saaten, Saatenkomponenten und hüllen-reduzierten Fraktionen sind in Tab. 2-1 dargestellt.

Tab. 2-1: Analysen der verwendeten Rapssaaten: x_{C_S} -Fettgehalt der Saat; $x_{C_{KF}}$ -Fettgehalt des Kernfleisches; x_{C_H} -Fettgehalt der Hüllen; x_{H_S} -Hüllengehalt der Saat; $x_{C_{SR}}$ -Fettgehalt des Schälrapses; $x_{H_{SR}}$ -Hüllengehalt des Schälrapses; alle Gehalte auf die Trockenmasse [% drb] bezogen

Saat [Jahr]	x_{C_S} [%]	$x_{C_{KF}}$ [%]	x_{C_H} [%]	x_{H_S} [%]	$x_{C_{SR}}$ [%]	$x_{H_{SR}}$ [%]
96	47,2	54,6	9,0	16,4	53,2	3,0
97	47,8	55,8	9,5	17,1	54,2	3,4
98	48,0	55,5	9,6	15,1	53,7	3,7

Die analytische **Bestimmung der Wassergehalte** erfolgte mit einem HAG-Gerät der Firma Brabender. Die Trocknung der im Walzwerk aufgeschlossenen Materialproben erfolgte bei einer Temperatur von 105 °C und einer Trocknungsdauer von 4 Stunden.

Mit dem **Aufschlussgrad** wird der prozentuale Anteil an mechanisch geöffneten Zellen beschrieben. Auf Grund der Abhängigkeit der extraktiven Fettfreisetzung von den stoffspezifischen Eigenschaften des Extraktionsguts kann durch die Aufnahme einer Fettfreisetzung-Kinetik eine Aussage über den Zustand des zellularen Gewebes und damit den Aufschlussgrad gemacht werden [64, 68].

Die Bestimmung des **Denaturierungsgrads** beruht auf einer Trockenrückstandsbestimmung. Dabei werden ca. 10 g Material in einem Walzwerk durch Flockierung aufgeschlossen und 15 min mit 0,1n-Natronlauge extrahiert. Die Primärlösung wird anschließend zentrifugiert, die Proteinlösung abgezogen und im Trockenschrank eingedampft. Da die Proteine mit zunehmender Denaturierung eine abnehmende Löslichkeit aufweisen, ist die Masse an Trockenrückstand eine Tendenz für den Denaturierungsgrad.

2.3 Der Versuchsstand des Schnecken-Experiments

Basis des Versuchstands ist eine Seiher-Schneckenpresse, die durch nachfolgend beschriebene Ausrüstungen an die Anforderungen zur Untersuchung des kontinuierlichen Pressvorgangs angepasst wurde.

2.3.1 Die Seiher-Schneckenpresse

In Abb. 2-1 ist der Versuchstand mit angeschlossener Einrichtung zur Messdatenerfassung dargestellt (Schneckenpresse AP 08, Reinartz/Neuss).

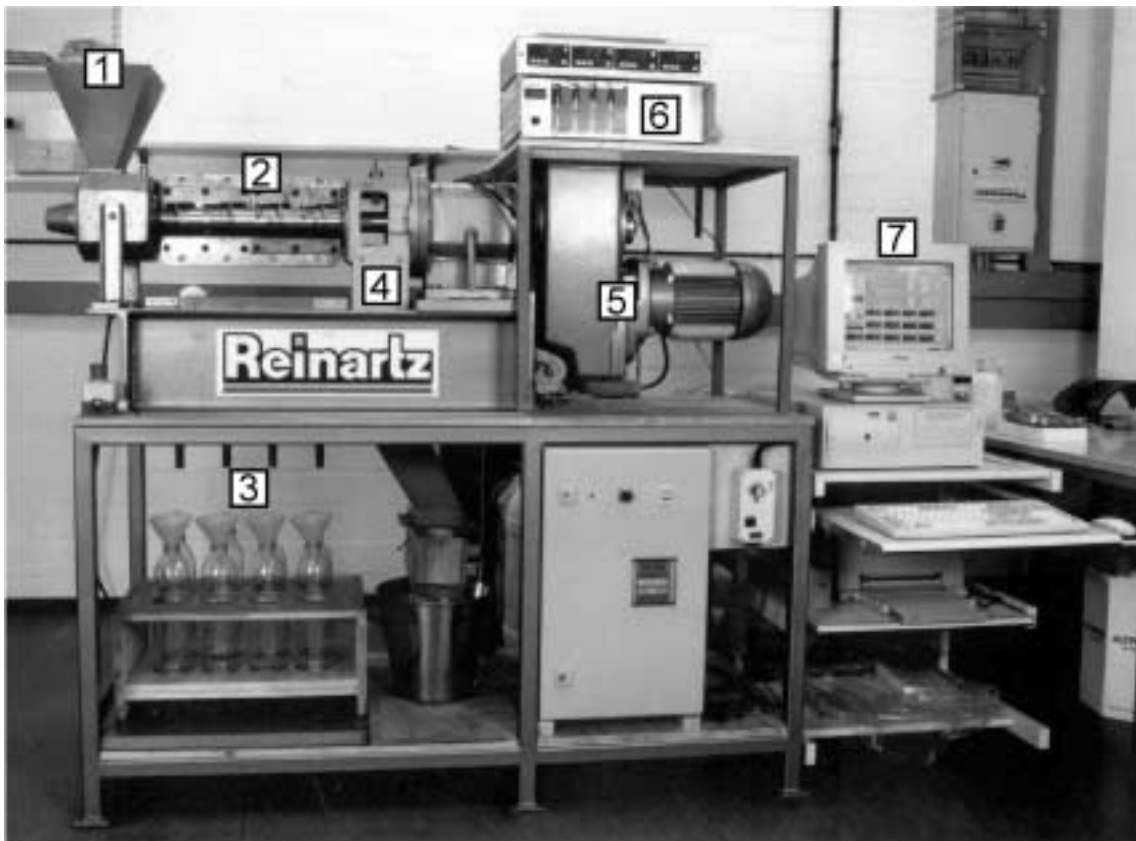


Abb. 2-1: Gesamtansicht der Versuchsanlage für Schnecken-Experimente:
(1) Saateinzug, (2) Seiherkammer mit Schneckenwelle, (3) Expul-
satablauf, (4) Schilferauswurf, (5) Antrieb (Getriebe, Motor, Lager),
(6) Messwerterfassung, (7) PC zur Messdatenverarbeitung

Im Einzugsbereich der Presse wird die Kuchenhöhe durch einen Konus von $z_0 = 30 \text{ mm}$ auf $z_1 = 16 \text{ mm}$ reduziert und die Saat vor dem Eintritt in die Seiherkammer vorverdichtet. Der Innendurchmesser der Seiherkammer D_s beträgt konstant 80 mm.

Die Presse kann zur Variation des Verhältnisses von Seiherlänge L zu Seiherdurchmesser D mit zwei verschiedenen Seiherlängen betrieben werden. Die unterschiedlichen Ausrüstungen für die zwei Pressenlängen bestehen aus zwei verschieden langen auswechselbaren Schneckendornen, auf welchen die einzelnen Schneckenelemente aufgeschoben und am Wellenende über eine zentrale Kontermutter gemeinsam verspannt werden. Die Konfiguration der eingesetzten Schneckenausrüstungen kann durch die Kombination unterschiedlicher Schneckenelemente variiert werden. Eine Kombination von Förder- und Kompressionselement bildet dabei eine Pressstufe. Der Standardseiher der Schneckenpresse ist über den äußeren stützenden Seiherkäfig in vier Seiherfelder unterteilt, deren Länge jeweils der einer Pressstufe der Schneckenwelle von 105 mm entspricht. Zur Verlängerung der Presskammer kann ein kurzer Seiher mit zwei Feldern angeflanscht werden. Einen Überblick über die wichtigsten Merkmale des Seiher gibt Tab. 2-2.

Tab. 2-2: Charakteristika der zwei unterschiedlichen Seiherlängen des Versuchstands für Schnecken-Experimente

Seiher ($D_S = 80$ mm)	Seiherlänge L_S [mm]	L_S/D_S	Anzahl Pressstufen
D 80-4	420	5,25	4
D 80-6	630	7,87	6

Der Einzug der Presse ist mit einem Trichter versehen, über den das Material frei, d. h. ohne Stopfeinrichtung von der Schneckenwelle eingezogen werden kann. Die Drehzahl der Schneckenwelle ist über einen Frequenzumformer stufenlos einstellbar; bei einer Netzfrequenz von $f = 50$ Hz beträgt die Drehzahl der Welle $n = 18 \text{ min}^{-1}$. Die messtechnische Ausrüstung der Seiher-Schneckenpresse umfasst Einrichtungen zur Druck- und Verweilzeitmessung sowie zur Massen- und Energiebilanzierung.

Die einzelnen Komponenten und Verfahren zur Messwerterfassung und Verarbeitung werden im Folgenden detailliert beschrieben.

2.3.2 Die Druckmessung

Das Messprinzip zur Ermittlung des radialen Drucks im Pressraum ist in Abb. 2-2 dargestellt. Der Aufbau der Druckmessstellen ist so zu gestalten, dass die Unregelmässigkeiten in der Symmetrie der Seiergeometrie im Hinblick auf die Reibungsbedingungen und die Ölflusswege vernachlässigbar sind.

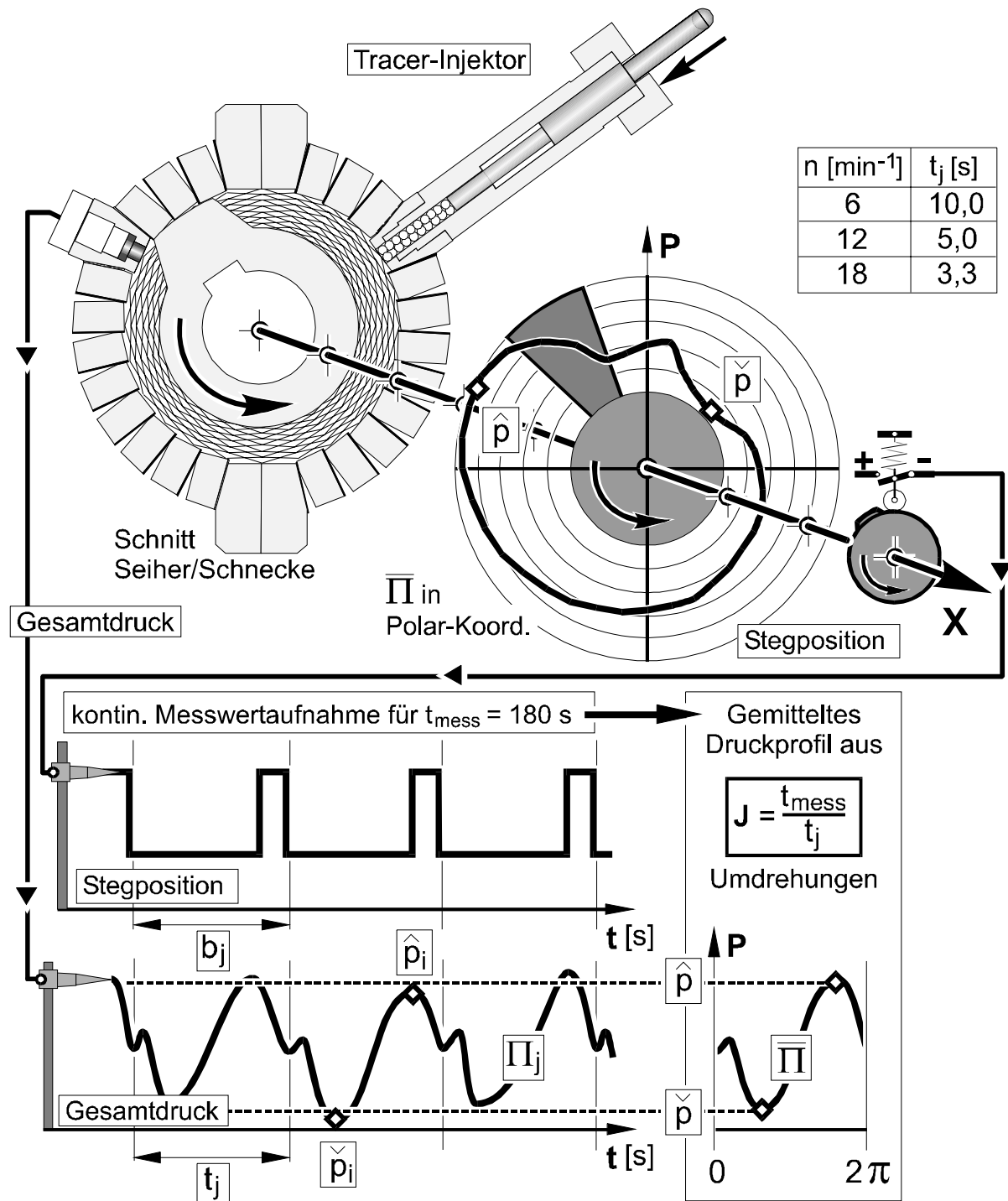


Abb. 2-2: Prinzip der Druckmessung

Zur Realisierung dieser Forderung werden Subminiatur-Drucksensoren auf der Basis von Halbleiter-DMS (Sensotec, Serie 81 G) verwendet. Die Sensor-Membran hat einen Durchmesser von nur 4,75 mm und ermöglicht einen Einbau der Druckaufnehmer in spezielle Seiherstäbe, die nur geringfügig breiter sind als die verwendeten Standardstäbe. Die Membran ist dabei frontbündig zur druckbeaufschlagten Seiherstabfläche positioniert. Der Messbereich der Sensoren liegt im Bereich von 0 bis 1000 bar, der kompensierte Temperaturbereich von -55 bis 150°C. Das analoge Ausgangssignal der Druckaufnehmer von 0 bis 6 mV wird mit Messkarten auf 0 bis 10 V verstärkt und über einen 12 Bit-A/D-Wandler digitalisiert. Mit einer Abtastfrequenz von $f_{\text{mess}} = 15 \text{ Hz}$ werden die digitalen Messwerte über einen IBM-kompatiblen PC aufgezeichnet und visualisiert.

Zur Bestimmung der aktuellen Helixposition wird an einem freiliegenden Ende der Schneckenwelle die Bogenlänge des orthogonal zur Längsachse geschnittenen Schneckenstegs durch einen Nocken proportional abgebildet. Durch Abtasten des Nockens über einen Schalter wird während der Rotation der Schneckenwelle ein Rechtecksignal mit einer Periodenlänge von 2π erzeugt und zeitgleich mit den Signalen der Sensoren über den PC erfasst.

Während einer Wellenumdrehung wird das **Druckprofil einer Periode j** mit der Periodendauer t_j gemessen; t_j ist abhängig von der Drehzahl der Schneckenwelle n (Abb. 2-2). Dabei wird eine Anzahl von I diskreten Druckwerten p_i gemessen:

$$I = t_j \cdot f_{\text{mess}} \quad (2-1).$$

Über die Bogenlänge $b_j = 2\pi$ bildet sich aus den diskreten Druckwerten p_i ein multimodales Druckprofil Π_j ab; die Druckwerte p_i alternieren zwischen einem Minimaldruck \check{p}_i und einem Maximaldruck \hat{p}_i (Abb. 2-2).

Zur Bestimmung eines **gemittelten Druckprofils aus J Perioden** muss die Druckmessung bei einer konstanten Drehzahl n im quasikonstanten Betriebszustand der Presse durchgeführt werden. Für die Dauer von t_{mess} erfolgt eine kontinuierliche Messwertaufnahme über J Perioden. Aus dem arithmetischen Mittel der diskreten Druckwerte

$$p_{ij} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J p_i \quad (2-2),$$

ergibt sich das gemittelte Druckprofil $\bar{\Pi}$ mit einem Minimaldruck \check{p} und einem Maximaldruck \hat{p} .

2.3.3 Die Verweilzeitmessung

Bei der Verweilzeitmessung an einer Seih-Schneckenpresse ist zwischen dem Verweilzeitverhalten des Feststoffs und dem des Fluids zu unterscheiden, wobei eine gegenseitige Beeinflussung systembedingt ist. Eine Verweilzeitmessung des Fluidstroms erfordert eine aufwändige Messtechnik [22]. Auf Grund der Abflussbedingungen am Seih ist aber die Qualität und Aussagekraft der zu erzielenden Ergebnisse schwer abzuschätzen. Eine Verweilzeitmessung des Feststoffstroms entspricht prinzipiell denen bei Untersuchungen an Extrudern [54, 56, 55]. Diese integralen Verweilzeitmessungen behandeln das durchströmte System jedoch als Black-Box.

In Abb. 2-3 ist das Prinzip der im Rahmen dieses Vorhabens entwickelten Methode der abschnittweisen Verweilzeitmessung dargestellt. Dabei wird die durchströmte Strecke in Subsysteme unterteilt, deren Grenzen jeweils an einem Markierungspunkt x_j beginnen und am Systemausgang bei $x = 0$ enden. Für jedes Sub-System j wird die mittlere Verweilzeit \bar{t}_j nach folgendem Prinzip ermittelt: Bei einem konstanten Betriebszustand werden an den Markierungspunkten x_j definierte Indikatormengen gleichzeitig in den Massenstrom injiziert. Am Schilferauswurf wird simultan die Probenentnahme gestartet und die austretende Masse jeweils für die Dauer eines konstanten Schnittintervalls ϑ fortlaufend in Proben k aufgeteilt (Abb. 2-3). Es kann anschließend jeder der in einer gezogenen Probe k enthaltenen Indikator-konzentrationen c_{jk} eine Aufenthaltsdauer t zugeordnet werden:

$$t = \vartheta \cdot k \quad (2-3).$$

Die differenzielle Darstellung der Indikatorkonzentration als Zeitfunktion führt zur Dichtefunktion, deren Integration zur Summenfunktion. Die ermittelten Verweilzeit-Funktionen können näherungsweise durch die mittlere Verweilzeit als Ersatzgrösse dargestellt werden.

$$\bar{t}_j = \frac{\sum c_{jk}(\vartheta \cdot k)}{\sum c_j} \quad (2-4).$$

Die aus der integralen Verweilzeit-Verteilung ermittelte mittlere Verweilzeit repräsentiert die Zeit, die das Komprimat zur Durchströmung des kompletten Systems benötigt. Das Auftragen der mittleren Verweilzeiten \bar{t}_j über die durchströmten Strecken x_j , führt zu einer Funktion $\bar{t}_j = f(x_j)$. Die Ableitung dieser Funktion stellt die Veränderung von v_{ax} im Schneckenkanal dar.

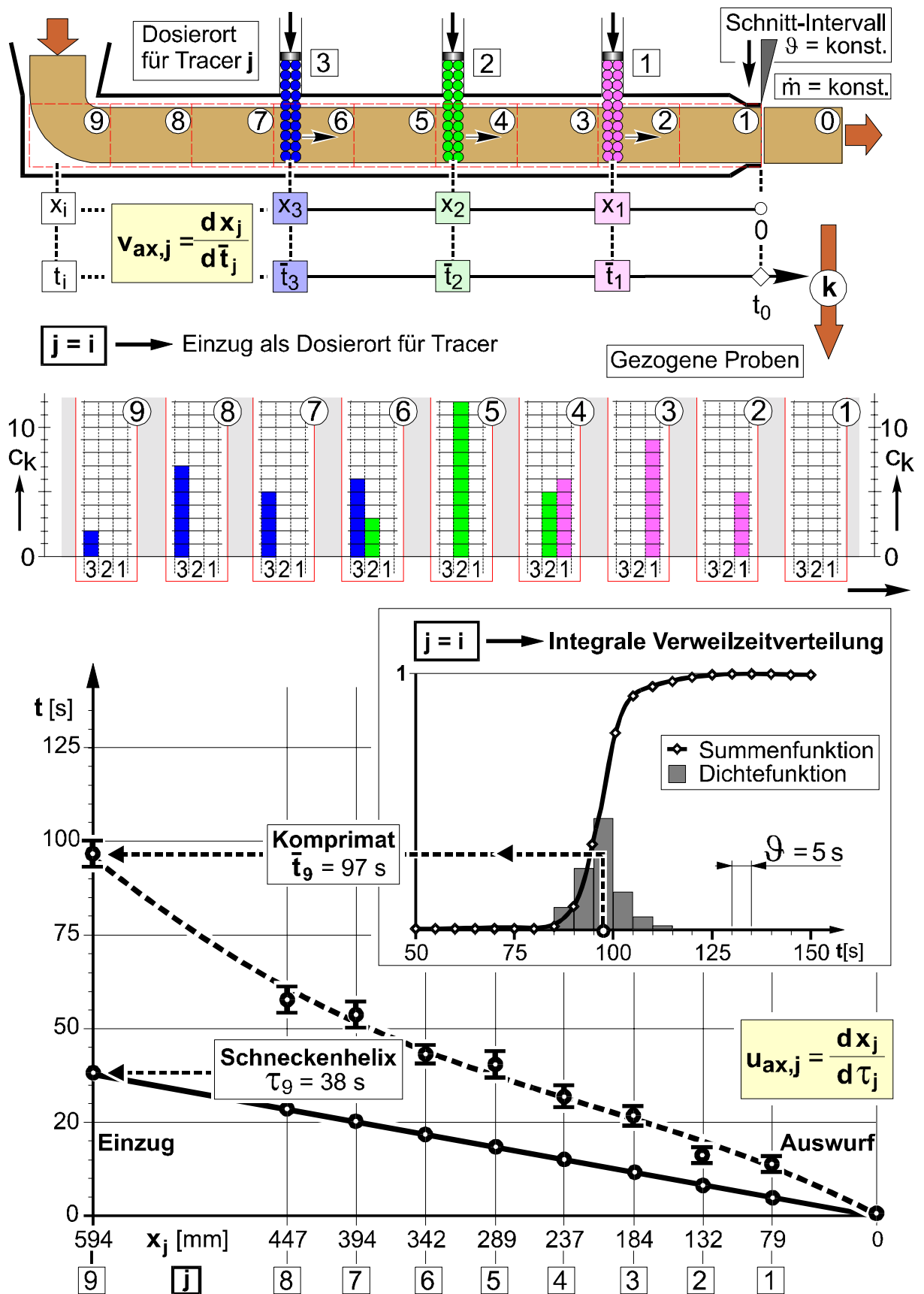


Abb. 2-3: Prinzip der Verweilzeitmessung und Auswertung der Messergebnisse

Im unteren Grenzfall wird das Komprimat rein axial von der Schnecke durch die Presse geschoben. Diese hypothetische Verweilzeit τ_j ist eine Funktion der Helixgeometrie, der Winkelgeschwindigkeit ω und des Weges x_j :

$$\tau_j = \frac{x_j}{\tan \gamma \cdot \omega \cdot R} \quad (2-5).$$

Die Ableitung von x_j nach τ_j stellt die axiale Vorschubgeschwindigkeit der Schneckenhelix u_{ax} dar.

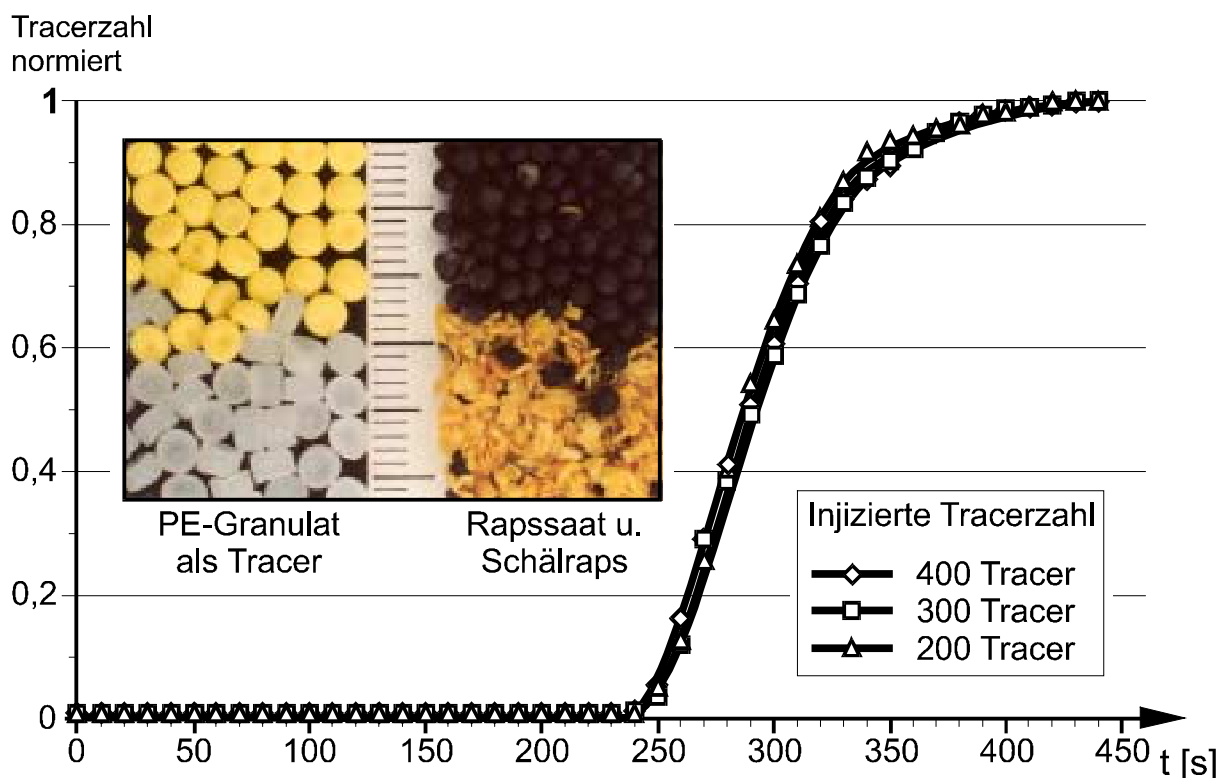


Abb. 2-4: Reproduzierbarkeit der Summenfunktion bei unterschiedlicher Dosierung von PE-Granulat im Einzug der Schneckenpresse

In Abb. 2-4 ist das als Indikator eingesetzte PE-Granulat mit einer Korngrösse von 2 bis 3 mm abgebildet. Es ist von der Trägersubstanz gut unterscheidbar, hat eine geeignete Partikelform und -grösse, sowie eine hinreichend elastische Konsistenz. Die Erzeugung eines Impulssignals mit definierter Indikator-Konzentration c_j ist im Einzugsbereich der Presse unproblematisch. Die Markierung des Massenstroms entlang der Seiherkammer erfordert jedoch auf Grund der Pressdrücke eine Injektionsvorrichtung. Diese Injektoren werden zur Unterscheidung der Markierorte j mit verschieden gefärbtem PE-Granulat gefüllt und in speziellen Seiherstäben am

Seiher fixiert. Zur Festlegung eines geeigneten Injektionszeitpunkts im Betriebszustand ist die Kenntnis der momentanen Stegposition und des charakteristischen Druckprofils erforderlich (siehe: Druckmessung, Abb. 2-2). Erreicht der Schneckensteg die Position unterhalb des Drucksensors, liegt das charakteristische Minimum des Druckprofils in etwa im Bereich der Injektions-Vorrichtung; der zu überwindende Widerstand ist in dieser Position am geringsten und die Bedingungen zur Erzeugung eines impulsförmigen Signals am günstigsten.

Bei der **Fehlerbetrachtung zur Verweilzeitmessung** sind folgende systematische Fehler zu berücksichtigen:

1. Die Erzeugung eines Impulssignals im Massenstrom müsste theoretisch innerhalb eines unendlich kurzen Zeitintervalls erfolgen. Die praktische Erzeugung des Impulssignals über die Injektoren erfolgt in einem Zeitintervall von ca. 2 Sekunden. Wird der theoretisch erforderliche Impuls näherungsweise in die Mitte dieses Zeitintervalls gelegt, ergibt sich ein zeitlicher Fehler von

$$\Delta t_{\text{Imp}} \approx \pm 1 \text{ s} \quad (2-6).$$

2. Es ist keine Aussage über den tatsächlichen Zeitpunkt möglich, an dem ein Tracer-Partikel innerhalb des Schnitt-Intervalls ϑ in den Probenbehälter k fällt. Ersatzweise wird der Zeitpunkt für alle Tracer-Partikel einer Probe auf die Mitte des Schnitt-Intervalls gelegt. Der maximale zeitliche Fehler beträgt also

$$\Delta t_{\vartheta} = \pm \frac{\vartheta}{2} \quad (2-7).$$

3. Die integrale Verweilzeitmessung vom Saateinzug zum Schilferauswurf weist von allen Subsystemen die maximale axiale Weglänge auf. Für drei Messungen mit jeweils unterschiedlicher Anzahl an induziertem Tracer im Einzug ergeben sich am Systemausgang annähernd gleiche Verteilungsfunktionen (Abb. 2-4).
4. Zeitliche Abweichungen durch das Bedienen der Vorrichtungen können kaum quantifiziert werden, bewegen sich bei allen durchgeführten Messungen aber annähernd im gleichen Rahmen.

Alle systembedingten Schwankungen beeinflussen den Feststofftransport und sind somit nicht als Fehler zu betrachten.

2.3.4 Die Massen- und Energiebilanzierung

Die Massen- und Energiebilanzierung eines durchströmten Systems kann immer nur eine Momentaufnahme des sich einstellenden Prozesszustands wiedergeben. Aus diesem Grund ist es erforderlich, das betrachtete System vor Beginn der Messung in einen stationären Betriebszustand mit einem konstanten Massenstrom und einem thermischen Gleichgewicht zu bringen.

Zur **Massenbilanzierung** werden nach dem Erreichen eines konstanten Betriebszustandes die austretenden Massenströme von Schilfer S und Expulsat E für die Dauer von 300 s in Behältern aufgefangen und ausgewogen. Die Expulsatmassen werden dabei für jedes Seiherfeld (Pressstufe) separat erfasst. Die Massenbilanzierung ist in Abb. 2-5 qualitativ dargestellt.

Zur **Energiebilanzierung** wird die aufgenommene Leistung des antreibenden Elektromotors aufgezeichnet. Die Wirkleistung P_{el} ist die elektrische Energie, die in eine beliebige andere Energieform (z.B. Wärme oder mechanische Energie) umgewandelt wird [33]. Werden die Energieverluste P_{diss} des Pressenantriebs (Elektromotor $\mu = 86 \%$, Getriebe/Lager $\mu = 94 \%$) berücksichtigt, kann die SME entsprechend berechnet werden (Abb. 2-5):

$$SME = \frac{P_{el} - P_{diss}}{\dot{m}} = \frac{P_{mech}}{\dot{m}} \quad \text{mit } P_{diss} = P_{el} \cdot (1 - \mu) \quad (2-8).$$

Die Änderung von P_{diss} unter Last (erhöhte Reibung) kann im vorliegenden Fall nicht quantifiziert werden, da die Energieverluste des Antriebs nur im Leerlauf der Maschine ermittelt werden konnten. Der elektrische Antriebsmotor der Presse ($P_{nenn} = 3,5 \text{ kW}$) wird über einen digitalen Frequenzumformer drehzahlgesteuert. Über eine Schnittstelle am Umformer wird die aufgenommene Wirkleistung des Elektromotors über einen IBM-kompatiblen PC aufgezeichnet und visualisiert.

Zur **Temperaturmessung** werden NiCr-Ni-Thermoelemente (DIN 43 710) am Seiherkorb jeweils in der Mitte eines Seiherfeldes plaziert. Dabei werden die isolierten Sensorköpfe in die keilförmigen Seiherpalte geklemmt, so dass an der Messstelle das Pressöl noch in Kontakt mit dem durch die Reibungswärme aufgeheizten Seiher steht. Die Thermoelemente sind über eine Ausgleichsleitung (DIN 43 712) mit digitalen Einbaumessgeräten (Genauigkeit 0,3 %) verbunden, welche die Messwerte als Signal von 0 bis 10 V bereitstellen. Diese werden über einen PC aufgezeichnet und visualisiert.

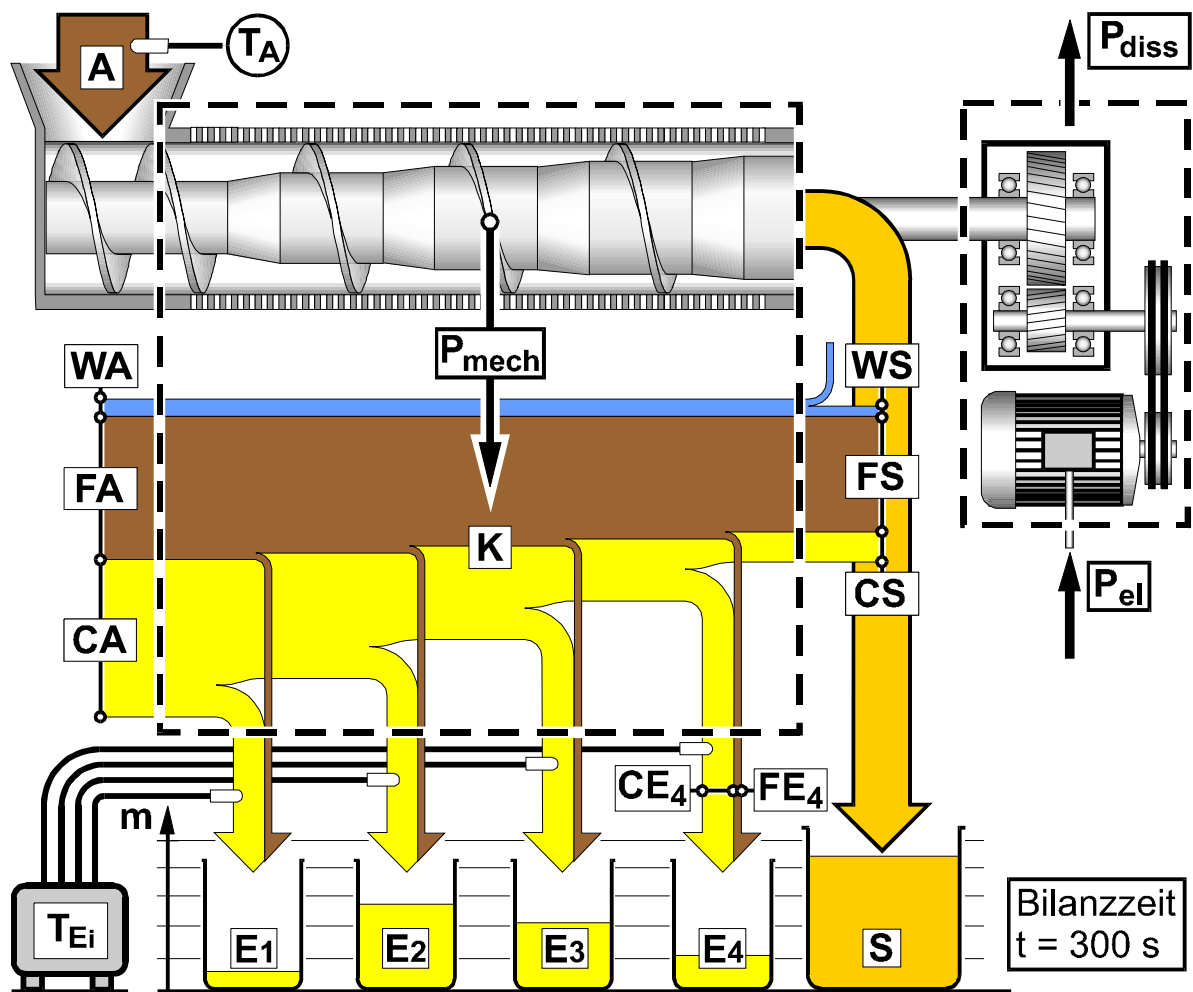


Abb. 2-5: Massen- und Energiebilanzierung: Prinzip der Versuchstechnik

Die **Thermographie** wird als eine ergänzende Untersuchungsmethode eingesetzt um exemplarisch die komplexe Temperaturverteilung auf der Oberfläche des Seihers und der Schneckenwelle im Pressraum darzustellen. Das System ist für einen Wellenlängenbereich von 2 bis 5 μm ausgelegt. Das Detektor-Ausgangssignal wird im Kamerakopf verstärkt, digitalisiert und über einen Adapter an einen IBM-kompatiblen PC übertragen. Der Temperaturmessbereich reicht von -10 bis $+1200^\circ\text{C}$ bei einer Temperaturauflösung von $\pm 0,12\text{ K}$ (30°C Objekt-Temp.) und einer absoluten Temperaturmessgenauigkeit $< \pm 2\text{ K}$ (Messbereichsendwert) bis 100°C [38].

2.4 Der Versuchsstand des Linear-Experiments

In Abb. 2-6 ist die Einspindel-Universalprüfmaschine (UPM) Typ 1488 der Firma Zwick/Roell abgebildet. In diese Prüfmaschine wurde eine speziell angefertigte Presskammer integriert, wie sie in Abb. 2-7 abgebildet ist.

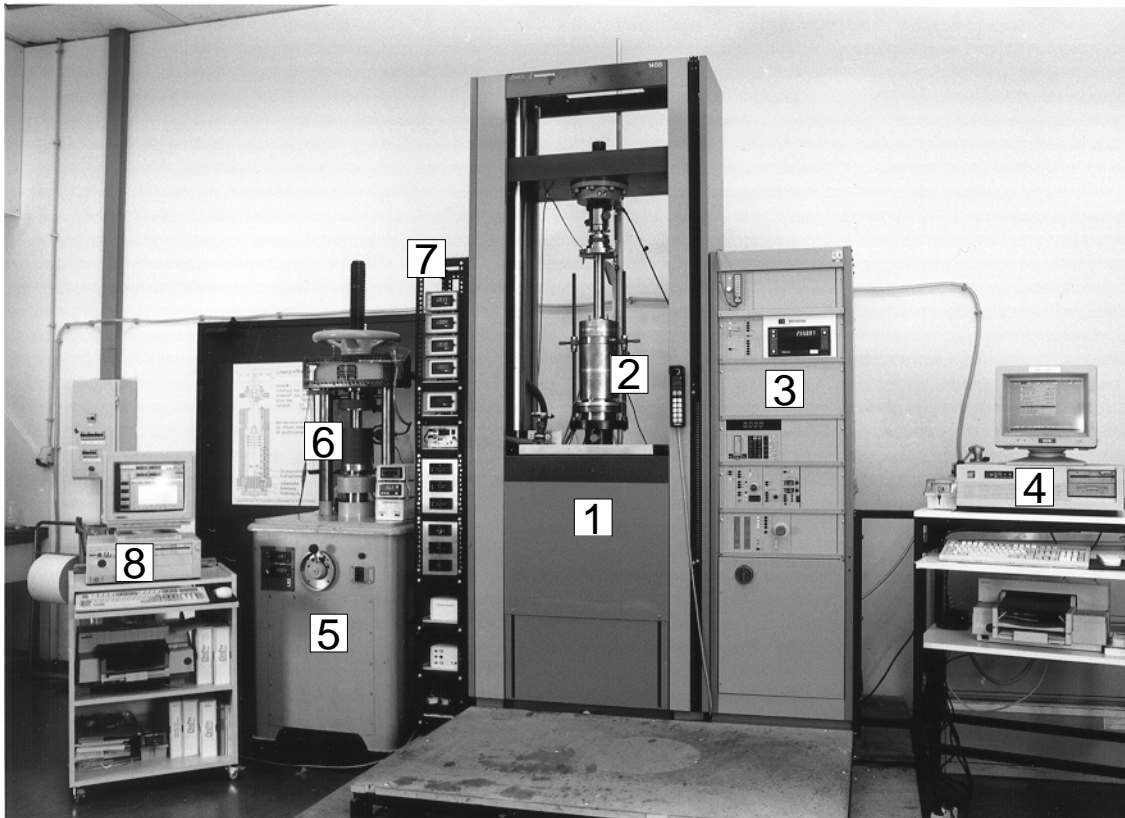


Abb. 2-6: Gesamtansicht der Versuchsanlage für Linearpressversuche: (1) Universalprüfmaschine, (2) Linearpresskammer, (3) Schaltschrank mit Mess- und Steuereinheit, (4) Steuerungsrechner für programmierte Versuche, (5) Hydraulikpresse, (6) Drainageöl-Zylinder, (7) Messverstärker und Anzeigen, (8) PC zur Messdatenerfassung [60]

Die UPM kann mit dem Steuerungsprogramm ZIMT des Herstellers ZWICK über einen PC kraft- oder weggeregt fahren. Die Traversengeschwindigkeit ist in den Grenzen von etwa 0,1 bis 200 mm/min variierbar. Die erforderlichen Kompressions-Parameter können durch programmierte Versuchsabläufe eingestellt werden.

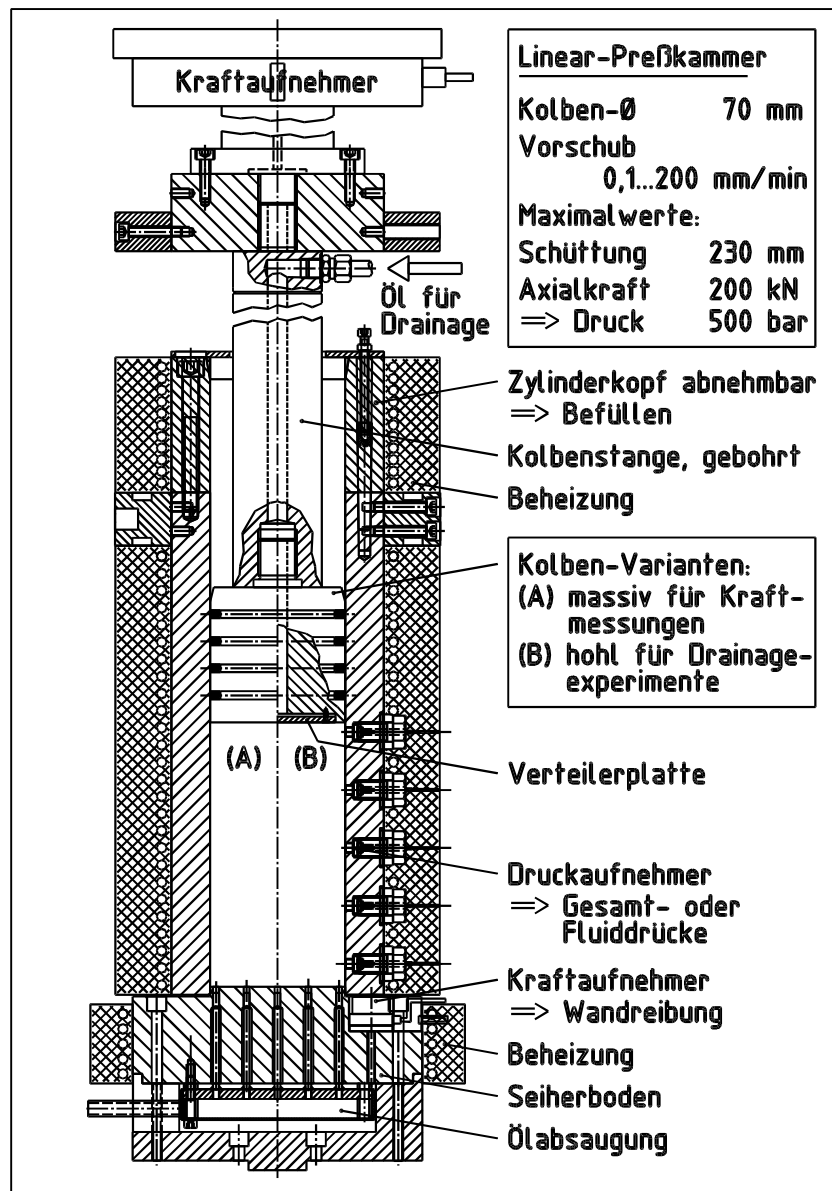


Abb. 2-7: Presskammer für die Linearpressversuche (Binz)

Die Presskammer (Abb. 2-7) hat einen Innendurchmesser von 70,3 mm. Mit der maximalen Axialkraft der UPM von 200 kN sind in der Presskammer Drücke von ca. 500 bar (194 kN) zu erzeugen. Die beiden Zylinderkomponenten und der Seiherboden sind durch separate Mantelheizungen bis 100 °C temperierbar. Der mit Löchern (Ø 3,0 mm) für den Ölabfluss versehene Seiherboden ist mit der beweglichen unteren Traverse verschraubt (vgl. Abb. 2-6). Um ein Herauspressen des Feststoffs zu verhindern, wird der Lochseihboden mit einem Schlitzlochblech (0,4*4,0 mm; 16 % geöffnete Fläche) und ein Filterpapier (Typ 520b, Schleicher & Schuell) abgedeckt. Über Drucksensoren in der Zylinderwandung werden die Komprimatradialdrücke erfasst.

2.5 Relevante Versuchsparmeter; Varianten und Grenzwerte

Als relevante Versuchsparmeter sind die geometrischen Bedingungen in der Presskammer (Schnecke/Seiher), die Drehzahl der Schneckenwelle und die Eigenschaften des Komprimats anzusehen. Bei den geometrischen Einflussgrößen ist zwischen der Schneckengeometrie und der Seiherkonfiguration zu unterscheiden. Bei der Schneckengeometrie ist nochmals zwischen der Helix- und der Kerngeometrie zu differenzieren.

Der **Helixgeometrie** kommt die Aufgabe des Materialtransports in den sich verengenden Pressraum zu. Um die im Arbeitsmodell aufgestellte Forderung zu realisieren, dass jedes Seiherfeld eine Pressstufe der Helixgeometrie umschliesst, ist diese mit der Seihergeometrie abzustimmen. Die Länge eines Seiherfeldes beträgt 105 mm. Jede Pressstufe besteht aus einem Förder- und einem Kompressionselement. Daraus ergibt sich für jedes Schneckenelement eine Länge von 52,5 mm. Um das Material gleichmäßig transportieren zu können, ist ein Förderelement mit einer Stegwindung von mindestens 360° zu versehen, so dass sich in der Projektion des Stegs in Förderrichtung ein vollständiger Ring ergibt. Die Steigung G für den Schneckensteg der Förderelemente entspricht damit der Länge eines Schneckenelements von 52,5 mm; am Schneckendurchmesser D_H ist $\gamma = 11,8^\circ$. Zur Untersuchung einer degressiven Steigung des Schneckenstegs wird G nach Tab. 2-3 variiert.

Tab. 2-3: Variation der Gangsteigung G [mm] in den Pressstufen des 4-stufigen Schnecken-Experiments

Stufe	1(Einzug)	2	3	4
D 80-4	52,5	42,0	35,0	30,0

Die **Kerngeometrie** der Schneckenwelle erzwingt die Kompression des Materials durch einen zunehmenden Kerndurchmesser in Förderrichtung. Eine charakteristische Grösse ist die Kompressionslänge L_K . Bei einer konstanten Zunahme des Schneckenkerns Δz kann durch eine Veränderung von L_K die Steigung des konischen Kompressionsabschnitts beeinflusst werden. Als kennzeichnende Grösse wurde im Arbeitsmodell das Kompression-Längenverhältnis κ definiert (vgl. Seite 19). Die Veränderung der Kerngeometrie der Schneckenwelle durch die Variation der L_K ist in Abb. 2-8 dargestellt. Als oberer Grenzwert ergibt sich bei einem Kompressionselement ohne Relaxationslänge ein κ von 1. Eine Halbierung der Kompressionslänge bewirkt

eine Halbierung von κ . Bei konstantem Δz ergibt sich ein entsprechend steilerer Konus. Als unterer Grenzwert für κ wird eine konstante Konussteigung von 45° in allen Pressstufen festgelegt. Daraus ergeben sich in Förderrichtung abnehmende Werte für $\kappa < 0,1$ in den einzelnen Pressstufen.

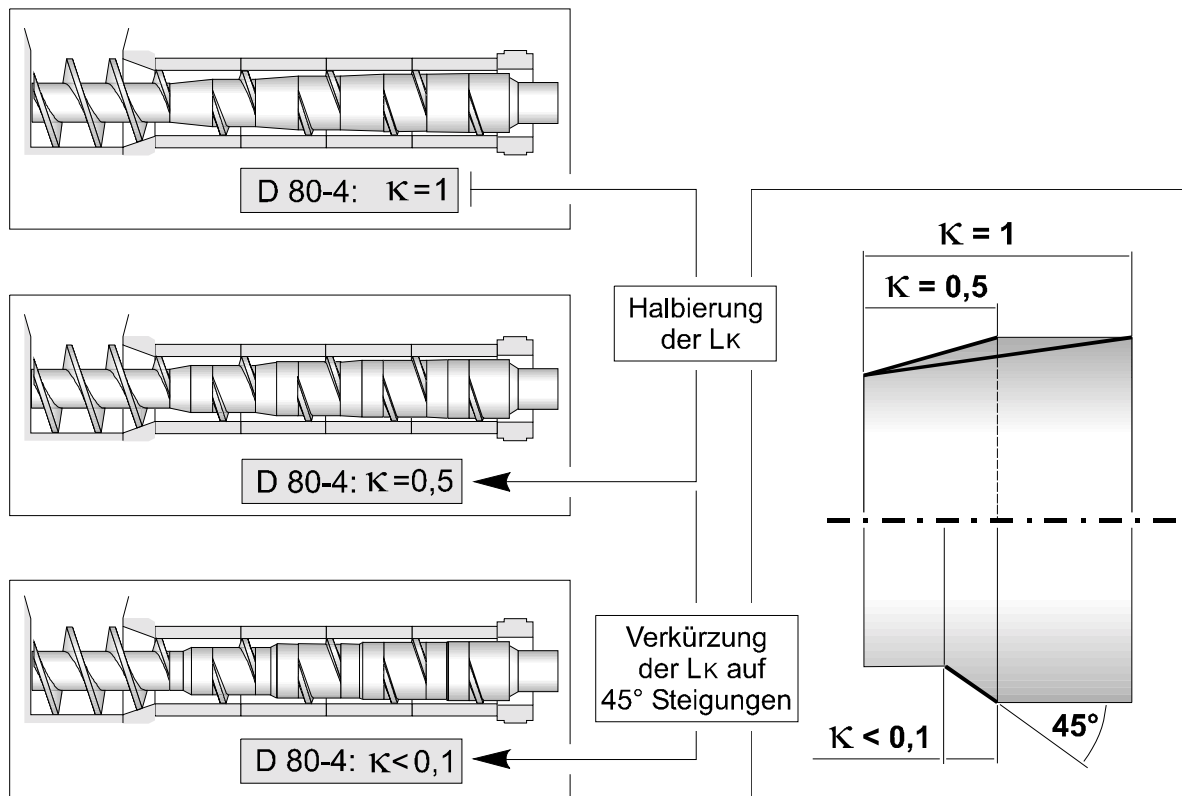


Abb. 2-8: Variation der Kerngeometrie am Beispiel des 4-stufigen Schnecken-Experiments

Die Geometrieparameter der Pressstufen im 4-stufigen und 6-stufigen Schnecken-Experiment sind Tab. 7-1 und Tab. 7-2 im Anhang zu entnehmen.

Die **Seiherkonfiguration** beeinflusst den Pressvorgang in doppelter Hinsicht als Drainagefläche für das Expulsat und als Reibfläche für das Komprimat. Die Auswirkungen einer Seiherverlängerung auf das Pressergebnis sind anhand der 4-stufigen und der 6-stufigen Seihervariante nach Tab. 2-2 zu überprüfen.

Die Funktion der Drainagefläche erfolgt über die Einstellung der Seiherpalte **S**; anzustreben ist ein ungehinderter Expulsatabfluss. Die Seiherpalte sind dazu so einzustellen, dass das abzapressende Fluid nicht am Abfluß behindert und der Reibwiderstand durch eine aufgestaute Fluidschicht

zwischen Seihewandung und Komprimatoberfläche drastisch reduziert wird; die Folge ist im Extremfall eine reine Rotationsbewegung des Materials mit der Schneckenwelle. Die Seiherspalt sind aber mit steigendem Druck enger einzustellen, um ein übermäßiges herauspressen von Feststoff zu verhindern. Zur Reproduzierbarkeit werden die Seiherspalt in den verschiedenen Experimenten konstant gehalten. Zur Seierkonfiguration wurden dazu unterschiedliche Einstellungen überprüft und für das 4-stufige und 6-stufige Schnecken-Experiment die in Tab. 2-4 aufgetragenen Werte für S festgelegt.

Tab. 2-4: Variation der Seiherspalt S [mm] in den Seierfeldern des 4-stufigen und 6-stufigen Schnecken-Experiments

Seierfeld	1(Einzug)	2	3	4	5	6
D 80-4	0,5	0,4	0,3	0,3	-	-
D 80-6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3

Innerhalb eines Seierfeldes wird die Seierkonfiguration konstant gehalten. Die Varianten des Anstellwinkels σ sind in Abb. 2-9 dargestellt. Im 4-stufigen und 6-stufigen Standardversuch wird der Anstellwinkel konstant auf $\sigma = 5^\circ$ gehalten. Bei einer Variation des Anstellwinkels erfolgt eine Veränderung grundsätzlich in Förderrichtung mit abnehmenden Winkeln, d.h. der Reibwiderstand an der Seierinnenwandung soll mit zunehmender Rückstellkraft des Komprimats reduziert werden.

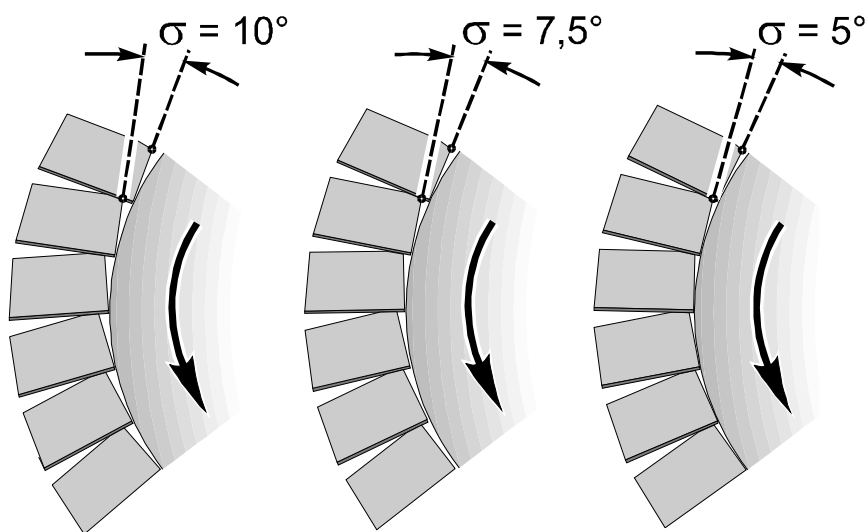


Abb. 2-9: Variation des Anstellwinkels σ

Die **Drehzahl der Schneckenwelle** bestimmt die Bewegungsverhältnisse in der Seiherkammer und in der Folge den axialen Vorschub des Materials. Neben dem Steigungswinkel des Schneckenstegs γ ist vor allem die Drehzahl der Schneckenwelle n von Bedeutung; aus dem Produkt der Steigung des Schneckenstegs G und der Drehzahl n ergibt sich die axiale Vorschubgeschwindigkeit der Schneckenhelix u_{ax} .

Die Drehzahl des Pressenmotors ist über einen Frequenzumformer stufenlos einstellbar, wobei die Netzfrequenz von $f = 50$ Hz als Maximum festgelegt wird. Aus der Getriebeübersetzung ergibt sich damit eine Drehzahl der Schneckenwelle von $n = 18 \text{ min}^{-1}$. Als Varianten sollen mindestens zwei weitere Drehzahlen festgelegt werden. Eine geeignete symmetrische Abstufung der Wellendrehzahl zur Variation von u_{ax} ist in Tab. 2-5 aufgetragen.

Tab. 2-5: Variation der Drehzahl $n [\text{min}^{-1}]$ zur Veränderung der axialen Vorschubgeschwindigkeit u_{ax} (für $G = 52,5 \text{ mm}$)

$n [\text{min}^{-1}]$	18	12	6
$u_{ax} [\text{mm/s}]$	15,75	10,5	5,25

Für das **Linear-Experiment** wird von Raß [60] orientiert an den Kompressionsverhältnissen in einem 4-stufigen Schnecken-Experiment ein Standardversuch definiert. In dem Transformationsmodell wird eine kontinuierliche axiale Transportgeschwindigkeit im Schneckenkanal postuliert. Daraus ergibt sich für das Linear-Experiment ein 4-stufiges Pressregime von 3 Minuten Dauer. Dieses wird auf Grund der getroffenen Annahme einer rein axialen Materialbewegung im Schneckenkanal in gleich lange Kompressions- und Relaxationsphasen von je 22,5 s unterteilt. Die Festlegung der Stufen-Kompressionsgrade in den einzelnen Pressstufen erfolgt anhand zuvor ermittelter Ergebnisse für variante Stufen-Kompressionsgrade. Dieser Standardversuch entspricht nach dem aufgestellten Transformationsmodell der 4-stufigen Schneckengeometrie mit $\kappa = 1$. Die Stufenparameter des 4-stufigen und 6-stufigen Linear-Experiments für die verschiedenen Kompressions-Längenverhältnisse der Kerngeometrie aus dem Schnecken-Experiment sind Tab. 7-3 und Tab. 7-4 im Anhang zu entnehmen.

Der Einfluss der **Komprimateneigenschaften** auf das komplexe Verhalten von Rapskomprimaten wurde im Linear-Experiment bereits ausführlich unter den für die Funktion einer Schneckenpresse wichtigen Aspekten der

Komprimatdrainage und der Rückstellkraft untersucht [60]. Die Komprimat-eigenschaften werden entsprechend der in Tab. 2-6 angegebenen Werte variiert.

Tab. 2-6: Variation der Komprimatparameter

Parameter		Spektrum	
Hüllengehalt	xH [%]	5	17
Saattemperatur	T [°C]	30	70
Aufschlussgrad	ω [%]	25	85
Denaturierungsgrad	D [%]	0	100
Wassergehalt	xW [%]	2 bis 7	

2.6 Zur Konzeption des Versuchsprogramms

In Kap. 2.5 wurden Versuchsparameter in ihren Varianten und Grenzwerten definiert, die gemäß dem Arbeitsmodell und den Erkenntnissen aus Linear-Experimenten [60] Einfluß auf das kontinuierliche Trennpressen biogener Feststoffe in Schneckengeometrien ausüben.

Die vollständige Durchführung einer theoretischen Versuchsmatrix in der jede der aufgeführten Einflussgröße innerhalb ihrer Grenzwerte variiert und mit den konstant gehaltenen übrigen Parametern kombiniert wird, steht einer ökonomischen Untersuchung des kontinuierlichen Pressvorgangs entgegen. Erschwerend kommt hinzu, dass für eine große Anzahl an Schnecken-Experimenten eine erhebliche Rohstoffmenge erforderlich wäre. Die Konzeption eines sinnvollen Versuchsprogramms erfordert daher eine sinnvolle Kombination der aufgeführten Parameter zu einer überschaubaren Versuchsmatrix die gleichzeitig zu aussagekräftigen Ergebnissen führt.

Aufgrund der Komplexität des Pressvorgangs ist eine Differenzierung in auf einander aufbauende Teilaspekte zweckmäßig. Geeigneter Ausgangspunkt für diese sukzessive Erarbeitung des Problemkreises sind die fundamentalen Funktionen der Schneckenwelle.

Die **Funktion der Helixgeometrie** und ihr Einfluss auf den Pressvorgang sind noch weitgehend ungeklärt. Daher soll deren Arbeitsweise und Wirkung in Vorversuchen genauer untersucht werden. Die komplexe Wechselwirkung

zwischen Materialbewegung und Kraftreaktion wird neben der sich verengenden Pressraumgeometrie insbesondere durch die Relativbewegung zwischen rotierender Schneckenhelix und statischem Seiher beeinflusst. Um das aufgestellte Arbeitsmodell bezüglich dieser Wechselwirkung überprüfen zu können, sind Experimente erforderlich, in denen bei konstanter Kerngeometrie ($\kappa = 1$) die Helixgeometrie und die Seiherkonfiguration variiert werden. Variiert werden:

- die Drehzahl der Schneckenwelle (Tab. 2-5)
- die Seiherkonfiguration (Tab. 2-4; Abb. 2-9)
- die Helixgeometrie (Tab. 2-3)

Die Komprimateneigenschaften sind weitgehend konstant zu halten. Die sich daraus ergebende Versuchsmatrix ist im Anhang in Tab. 7-5 aufgeführt. Anhand der Versuchsergebnisse ist eine optimierte Helixgeometrie für nachfolgende Experimente zu definieren.

Die Untersuchungen zum **Einfluss der Komprimateneigenschaften** auf das Pressergebnis erfordern die zuvor definierte Pressenkonfiguration als konstant zu haltende Basis. In diesem Arbeitsabschnitt sind das Schnecken- und das Linear-Experiment direkt miteinander zu vergleichen, da erst die Entkopplung des wechselwirkenden Systems Presse/Komprimat eine Beurteilung des Komprimatverhaltens in der Schneckenpresse zulässt. Da die Pressenkonfiguration konstant gehalten wird, ist nach dem in [60] vorgestellten Übertragungsmodell auch das Pressregime im Linear-Experiment konstant zu halten. Variiert werden:

- die Drehzahl der Schneckenwelle (Tab. 2-5)
- die Komprimateneigenschaften (Tab. 2-6)

Die sich daraus ergebende Versuchsmatrix ist im Anhang in Tab. 7-6 dargestellt. Aus den Ergebnissen dieses Arbeitsabschnitts sind für nachfolgende Experimente die Materialeigenschaften zu selektieren, deren Einfluss sich als dominant herausstellt.

Der **Betriebszustand einer Schneckenpresse** wird durch den offenen Ein- und Ausgang des durchströmten Systems beeinflusst. In Abhängigkeit von den Wechselwirkungen zwischen der Komprimatrheologie und der Pressraumgeometrie stellt sich ein sich ständig ausbalancierendes Gleichgewicht und als Folge ein quasistationärer Prozesszustand ein. Der dabei anzustrebende kontinuierliche und gleichmäßige Massendurchsatz ist

Voraussetzung für ein gleichbleibendes Pressergebnis zur Durchführung experimenteller Untersuchungen. In diesem Arbeitsabschnitt sind die Charakteristika eines quasikontinuierlichen Betriebszustands zu untersuchen. Variiert werden:

- die Drehzahl der Schneckenwelle (Tab. 2-5)
- die Kerngeometrie (Abb. 2-8)
- die Komprimatenschaften (Tab. 2-6)

Für den nachfolgenden Arbeitsabschnitt stellt der zu definierende quasikontinuierliche Betriebszustand eine Basis für experimentelle Untersuchungen dar.

Das ***kontinuierliche Trennpresen in Schneckengeometrien*** ist charakterisiert durch die Kraftreaktion des Komprimats und die Bewegung des Pressguts in der Seiherkammer. Die Massen- und Energiebilanzierung des durchströmten Systems liefert wichtige Informationen über das Pressergebnis. Unter konstant halten der in den Vorversuchen selektierten Parameter, ist der Einfluß unterschiedlicher Kerngeometrien, Seiherlängen und Schneckendrehzahlen sowie der dominaten Komprimatenschaften zu untersuchen. Variiert werden:

- Die Schneckendrehzahl
- Die Kerngeometrie
- Die Seiherkonfiguration
- Die Komprimatenschaften

Die sich daraus ergebende Versuchsmatrix ist im Anhang in Tab. 7-7 und Tab. 7-8 aufgetragen. Aus den Ergebnissen der Experimente dieses abschliessenden Arbeitsabschnitts sind Rückschlüsse bezüglich der "äußeren" und "inneren" Einflussgrößen im wechselwirkenden System Presse/Komprimat zu ziehen.

2.7 Die Darstellung der Versuchsergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse aus den Schnecken-Experimenten kann immer nur eine Momentaufnahme eines kontinuierlich durchströmten Systems wiedergeben. Die Ergebnisse werden immer als Mittelwerte aus Doppelmessungen abgebildet.

Die Darstellung der Ergebnisse ist in Abb. 2-10 als Beispiel wiedergegeben. Auf der Diagrammabszisse ist die Schneckenlänge, oder die

Länge des Pressweges aufgetragen. Im unteren Diagrammteil ist die Kerngeometrie und das Ergebnis der Massenbilanz abgebildet. Im oberen Teil des Diagramms wird die Helixgeometrie mit der Kraftreaktion und der Bewegung des Komprimats aufgetragen.

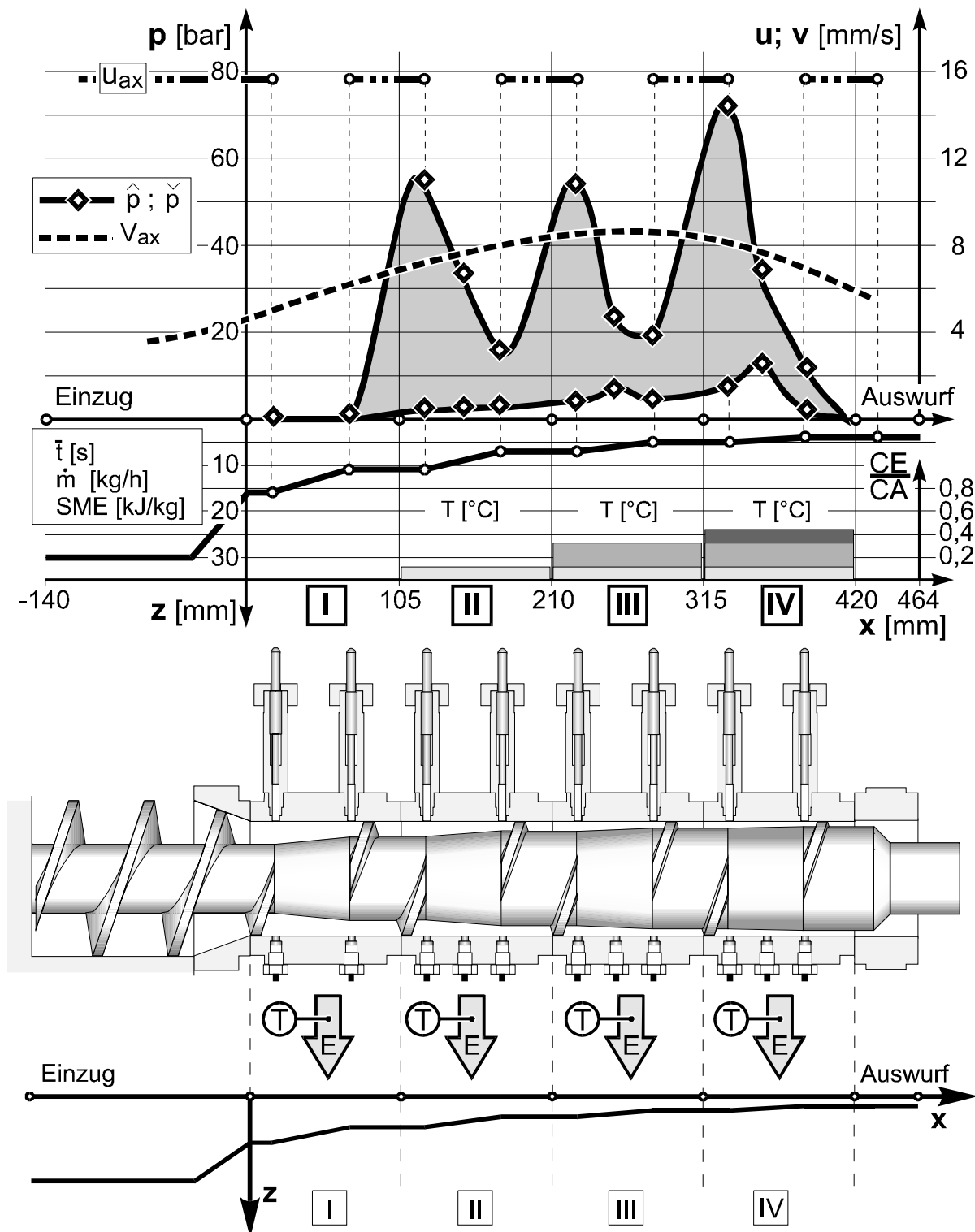


Abb. 2-10: Darstellung der Ergebnisse aus den Schnecken-Experimenten

3 Ergebnisse

3.1 Zur Funktion der Helixgeometrie

Die komplexe Wechselwirkung zwischen Materialbewegung und Kraftreaktion wird neben der sich verengenden Pressraum-Geometrie insbesondere durch die Relativbewegung zwischen rotierender Schneckenhelix und statischem Seiherr beeinflusst. Um das aufgestellte Arbeitsmodell bezüglich dieser Wechselwirkung zu überprüfen, werden im Folgenden die Ergebnisse von Schnecken-Experimenten betrachtet, in denen bei konstanter Kerngeometrie und gleichbleibenden Materialeigenschaften die Helixgeometrie und die Seiherrkonfiguration variiert werden.

3.1.1 Die Helixgeometrie mit geschlossenem Schneckensteg

Die in Abb. 3-1 dargestellten Schneckengeometrien sind gekennzeichnet durch:

- einen geschlossenen Schneckensteg der Helixgeometrie
- einen gleichbleibenden Steigungswinkel γ
- gleichlange Kompressions- und Relaxationszonen der Kerngeometrie
- eine Seiherrkonfiguration mit konstanten Anstellwinkel $\sigma = 5^\circ$, ohne statische Seihereinbauten (Abstreifplatten)

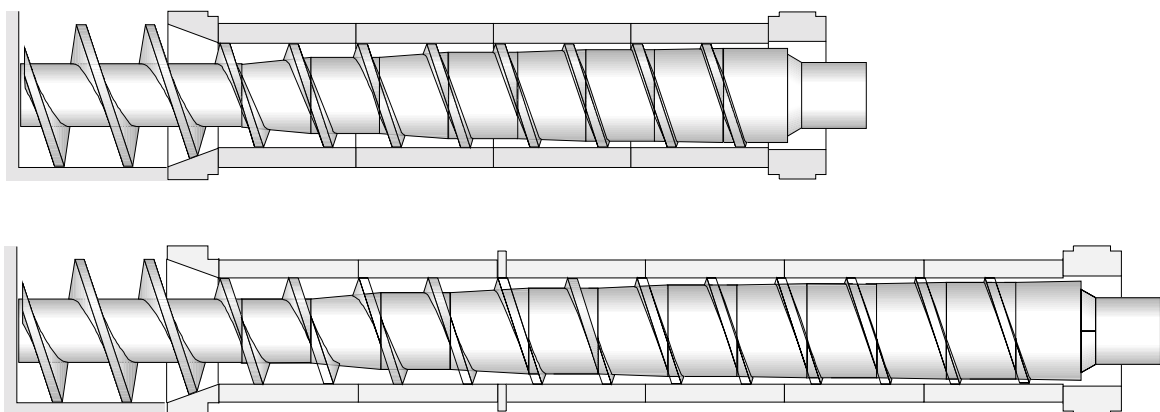


Abb. 3-1: 4-stufige und 6-stufige Schneckengeometrie mit geschlossenem Schneckensteg

Abb. 3-2 zeigt das Ergebnis eines 4-stufigen Schnecken-Experiments mit einer Geometrie gemäß Abb. 3-1 bei der Verarbeitung von Schälrapr.

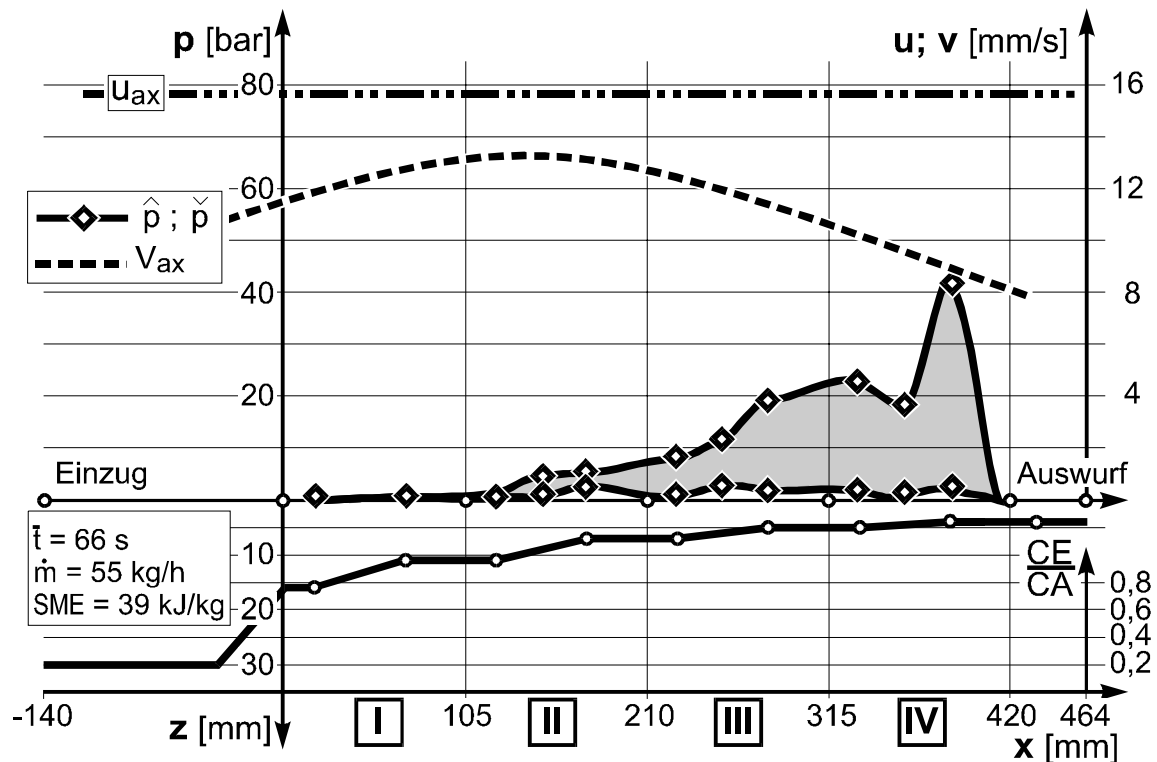


Abb. 3-2: Schnecken-Experiment D 80-4, Schneckenengeometrie gemäß Abb. 3-1; Schälrap; $XC = 1,13$; $xW = 4,5$ %; $xH = 5$ %; $\omega = 0,25$; $T_{saat} = 25$ °C

Auffällig ist, dass der über die Seiherrlänge bis auf ca. 40 bar ansteigende Pressdruck nicht zu einem Expulsatabfluss führt. Die axiale Vorschubgeschwindigkeit des Komprimats ist durch einen bogenförmigen Verlauf entlang des Seihers gekennzeichnet und kommt der Vorschubgeschwindigkeit der Helix teilweise sehr nahe; daraus ergibt sich eine Verweilzeit von 66 s und ein Massendurchsatz von 55 kg Saat pro Stunde. Die SME ist mit 39 kJ/kg Saat gering.

Die in Tab. 3-1 aufgetragenen Werte wurden bei unterschiedlichen Drehzahlen und Komprimatseigenschaften im 4-stufigen Schnecken-Experiment mit einer Geometrie gemäß Abb. 3-1 ermittelt. Auch unter den veränderten Bedingungen stellt sich kein Expulsatabfluss ein. Bei einem höheren Aufschlussgrad des Komprimats ist jedoch eine Abnahme der Kraftreaktion und als Folge eine Reduzierung des Massendurchsatzes zu verzeichnen. Die SME nimmt bei einem höheren Aufschlussgrad ebenfalls tendenziell ab. Eine Drehzahlreduzierung mindert die Kraftreaktion des Komprimats deutlich und scheint die Einleitung eines Expulsatabflusses nicht zu fördern.

Tab. 3-1: Ergebnisse aus Schnecken-Experimenten mit 4-stufiger Schneckenengeometrie gemäß Abb. 3-1 bei unterschiedlichen Drehzahlen und Komprimatigenschaften

xW [%]	xH [%]	ω [%]	D [%]	T_{saat} [°C]	n [min ⁻¹]	\dot{m} [kg/h]	t [s]	P [bar] *	SME [kJ/kg]	T_{Expul} [°C] *
4,5	5	25	0	25	12	36	92	0/2/12/22	40	- / - / - / -
6,0	5	85	0	25	12	27	99	0/5/0/10	14	- / - / - / -
4,5	5	25	0	25	18	55	66	0/5/20/40	39	- / - / - / -
6,0	5	85	0	25	18	42	76	0/0/13/13	9	- / - / - / -

* gemessen über die Seiherfelder 1 (Einzug) bis 4 (Auswurf)

Das in Abb. 3-3 dargestellte Ergebnis eines 6-stufigen Schnecken-Experiments mit einer Geometrie gemäß Abb. 3-1 unterscheidet sich gegenüber dem 4-stufigen Experiment. Der Pressdruck steigt ebenfalls bis auf ca. 40 bar kontinuierlich an. Die Verlängerung des Seiher führt hier aber zu einem minimalen Expulsatabfluss in den letzten beiden Seiherfeldern.

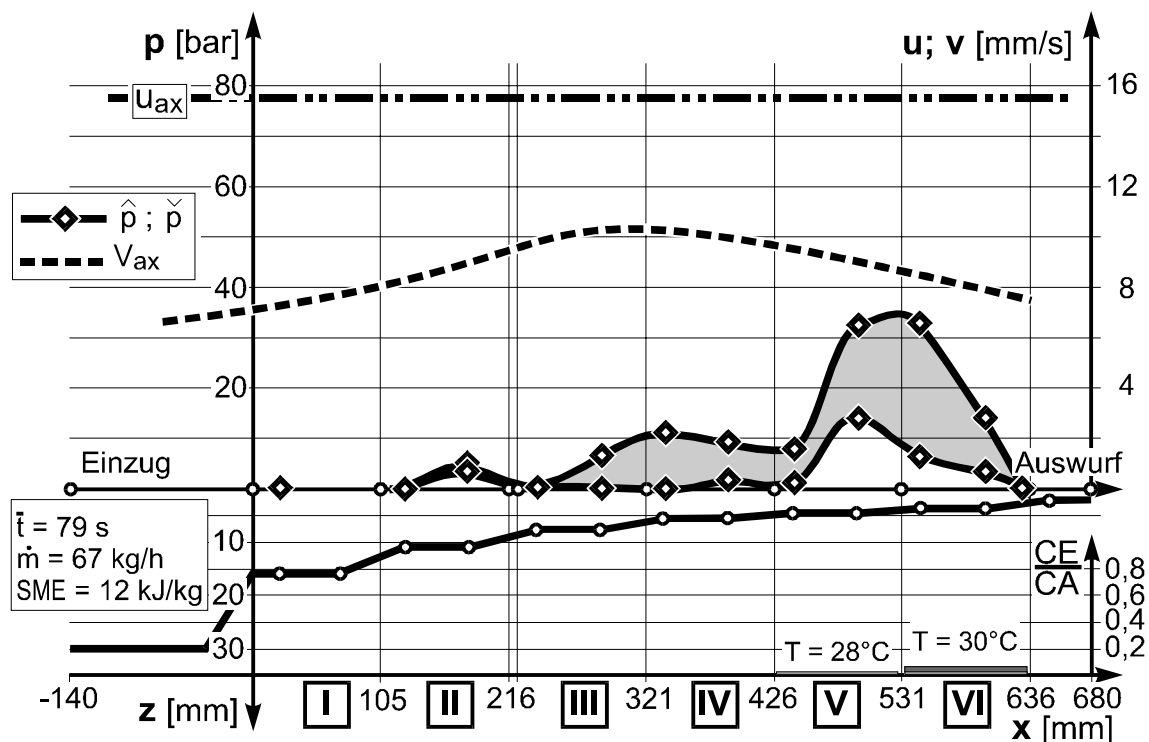


Abb. 3-3: Schnecken-Experiment D 80-6, Schneckenengeometrie gemäß Abb. 3-1; Schälrap; XC = 1,13; xW = 4,5 %; xH = 5 %; $\omega = 0,25$; $T_{\text{saat}} = 25$ °C

Der bogenförmige Verlauf der axialen Vorschubgeschwindigkeit über die Seiherlänge ist vergleichbar mit dem Verlauf im 4-stufigen Experiment. Die Geschwindigkeit ist aber insgesamt niedriger. Dadurch steigt in Verbindung mit dem längeren Pressweg die Verweilzeit auf 79 s an. Der Massendurchsatz ist gegenüber dem 4-stufigen Schnecken-Experiment um ca. 12 kg/h höher. In Verbindung mit dem gleich hohen Druckniveau ergibt sich ein entsprechend niedrigerer Wert für die SME von 12 kJ/kg.

Unter Einsatz einer Schneckengeometrie mit geschlossenem Schneckensteg gemäß Abb. 3-1 stellen sich im 4-stufigen und im 6-stufigen Schnecken-Experiment trotz einer niedrigen Kraftreaktion des Komprimats hohe axiale Vorschubgeschwindigkeiten und Massendurchsätze ein. Dieser Effekt scheint aber nicht an eine hohe Tangentialreibung am Seiher gekoppelt zu sein. Als ein Indiz dafür kann der ausbleibende bzw. minimale Expulsatabfluss angesehen werden, dessen Einleitung eine Mindestkraftreaktion erfordert.

3.1.2 Der Einfluss unterschiedlicher Seiherkonfigurationen

Unter der Annahme, dass eine Komprimatreaktion mit hohen Radialkräften, einerseits zum Aufbau einer Tangentialreibung, andererseits zur Einleitung eines Expulsatabflusses, einen bestimmten Verdichtungsgrad des Materials erfordert, ist ein möglichst frühes Erreichen dieses Zustands in der Presskammer anzustreben. Das Ziel muss also die Beeinflussung der Komprimatbewegung zu Beginn der Seiherkammer sein, um die lose Schüttung durch eine überwiegend axiale Förderung in den sich verengenden Pressraum möglichst schnell in einen festen Materialpfropfen zu überführen. Im Folgenden soll daher der Einfluss einer Veränderung der Reibungsbedingungen am Seiher in Verbindung mit einer Schneckengeometrie gemäß Abb. 3-1 untersucht werden.

In Abb. 3-4 ist das Ergebnis eines 4-stufigen Schnecken-Experiments mit geschlossenem Schneckensteg abgebildet. Eine Veränderung der Reibungsbedingungen am Seiher wurde durch eine sukzessive Abnahme des Keilwinkels σ der Seiherstäbe vom Einzug zum Auswurf realisiert. Das Pressergebnis ist durch einen bogenförmigen Verlauf der axialen Vorschubgeschwindigkeit des Komprimats charakterisiert, der zum Teil sehr nahe an die Vorschubgeschwindigkeit der Schneckenhelix heranreicht. Als Folge stellt sich eine Verweilzeit von 65 s und ein Massendurchsatz von 47 kg/h ein. Die gemessenen Radialdrücke steigen kontinuierlich bis auf ca. 13 bar an. Die Einleitung eines Expulsatabflusses wird nicht erreicht.

am Anfang der Presskammer im ersten Seiherfeld ein statischer Abstreifer eingesetzt. Unterstützend wird der Konus des ersten Kompressionselements steiler ausgeführt ($\kappa = 0,5$). Der Anstellwinkel der Seiherstäbe beträgt in allen Feldern $\sigma = 5^\circ$. Das Ergebnis des Experiments ist in Abb. 3-6 dargestellt.

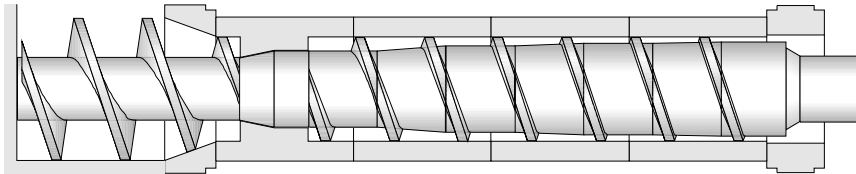


Abb. 3-5: 4-stufige Schneckengeometrie mit geschlossenem Schneckensteg und Abstreifern im ersten Seiherfeld

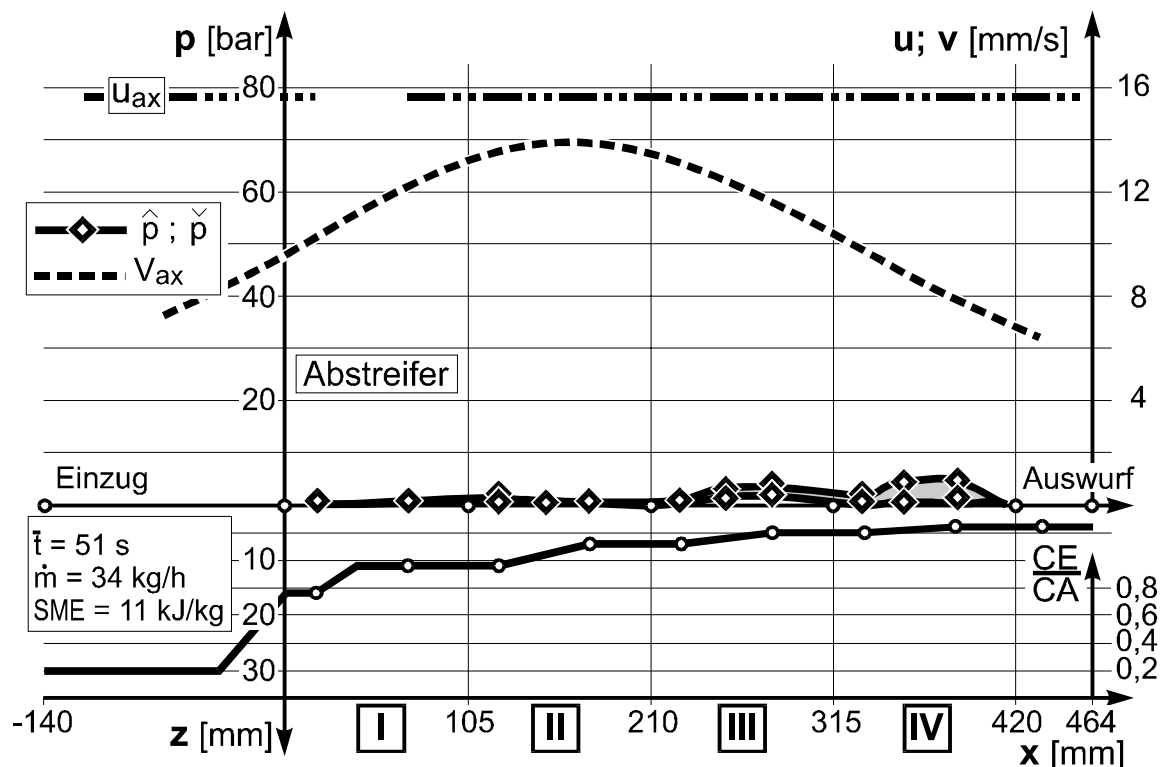


Abb. 3-6: Schnecken-Experiment D 80-4, Schneckengeometrie gemäß Abb. 3-5, Schälrapis; $XC = 1,13$; $xW = 4,5$ %; $xH = 5$ %; $\omega = 0,25$; $T_{saat} = 25$ °C

Die axiale Vorschubgeschwindigkeit des Komprimats ist über die Seiherlänge durch einen bogenförmigen Verlauf charakterisiert. Dabei erreicht die Komprimatgeschwindigkeit im zweiten Seiherfeld annähernd die Geschwindigkeit der axialen Vorschubgeschwindigkeit der Schneckenhelix.

Radiale Pressdrücke können nur im dritten und vierten Seiherfeld auf sehr niedrigem Niveau registriert werden.

Den Werten in Tab. 3-3 ist zu entnehmen, dass sich auch bei verschiedenen Komprimatigenschaften in den Ergebnissen des Schnecken-Experiments kein wesentlicher Unterschied zeigt. Tendenziell ist mit einem zunehmendem Aufschlussgrad eine Verlängerung der Verweilzeit und als Folge eine Abnahme des Massendurchsatzes zu verzeichnen. Die Kraftreaktion fällt im Vergleich zu den vorhergehenden Experimenten extrem niedrig aus. Ein Expulsatabfluss ist nicht zu verzeichnen.

Tab. 3-3: Ergebnisse aus Schnecken-Experimenten mit 4-stufiger Schneckenengeometrie gemäß Abb. 3-5 bei unterschiedlichen Komprimatigenschaften

xW [%]	xH [%]	ω [%]	D [%]	T _{saat} [°C]	n [min ⁻¹]	\dot{m} [kg/h]	t [s]	P [bar] *	SME [kJ/kg]	T _{Expul} [°C] *
4,5	5	25	0	25	18	34	51	0/0/5/7	11	- / - / - / -
6,0	5	85	0	25	18	27	73	0/0/2/2	13	- / - / - / -

* gemessen über die Seiherfelder 1 (Einzug) bis 4 (Auswurf)

Durch eine Veränderung der Reibungsbedingungen am Seiher kann das Pressverhalten der Schneckenengeometrie mit geschlossenem Schneckensteg hinsichtlich des anzustrebenden Expulsatabflusses nicht positiv beeinflusst werden. Charakteristisch für den geschlossenen Schneckensteg scheinen hohe axiale Komprimatgeschwindigkeiten zu sein. Durch die Veränderung der Reibungsbedingungen am Seiher wird dieser Effekt noch gesteigert, was sich in den zum Teil deutlich kürzeren Verweilzeiten gegenüber der Seiherkonfiguration mit einem flacheren Anstellwinkel σ zeigt (Kapitel 4.1.1). Damit verbunden sind noch geringere radiale Rückstellkräfte und ausbleibende Expulsatabflüsse. Es zeigt sich noch deutlicher, dass eine hohe Axialgeschwindigkeit des Komprimats nicht zwangsläufig mit einer hohen Kraftreaktion und einer hohen Tangentialreibung am Seiher gekoppelt ist.

3.1.3 Der Einfluss einer Drossel am Mundstück

Wird vor den Ausgang eines durchströmten Systems eine Drossel gesetzt, so ist anzunehmen, dass sich entgegen der Förderrichtung ein Materialrückstau einstellen wird, der die Komprimatigenschaften zum Systemeingang hin

beeinflusst. Im Folgenden soll daher untersucht werden, wie das Pressverhalten der in Abb. 3-7 dargestellten Schneckengeometrie mit kontinuierlicher Schneckenhelix und einer starken Reduzierung der Ringspalthöhe von 4 mm auf 2 mm am Auswurf der Presskammer das Pressergebnis und insbesondere den Expulsatabfluss beeinflussen kann.

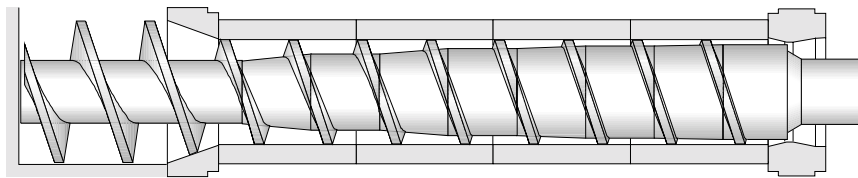


Abb. 3-7: 4-stufige Schneckengeometrie mit geschlossenem Schneckensteg und Drosselung vor dem Auswurf

In Abb. 3-8 ist das Ergebnis des 4-stufigen Schnecken-Experiments abgebildet. Bis zur Mitte des dritten Seiherfeldes ist ein nahezu druckloser Zustand zu verzeichnen. Im Übergang zum vierten Seiherfeld, direkt vor der Drosselung am Auswurf, ist eine plötzliche und sehr starke Druckzunahme auf über 60 bar zu registrieren. Die axiale Vorschubgeschwindigkeit des Komprimats steigt zu Beginn der Presskammer im Bereich des ersten Seiherfeldes zunächst an. Mit zunehmendem Pressdruck ist ein deutlicher Abfall der axialen Komprimatgeschwindigkeit zu verzeichnen. Im Bereich hoher radialer Drücke stellt sich ein hoher Expulsatabfluss ein. Trotz eines relativ hohen Massendurchsatzes von 39 kg Saat pro Stunde ist eine relativ lange Verweilzeit von 120 Sekunden zu verzeichnen. Dies ist mit der Aufteilung des eingehenden Massenstroms in zwei ausgehende Massenströme zu erklären.

Die im Vergleich zu den vorhergehenden Versuchen längere Verweilzeit des Feststoffs ist als ein Indiz für einen geringeren Massenausstoß am Mundstück der Presse anzusehen. Mit dem hohen Expulsatabfluss am Ende der Presskammer ergibt sich in der Summe aber ein hoher Saatchsatz.

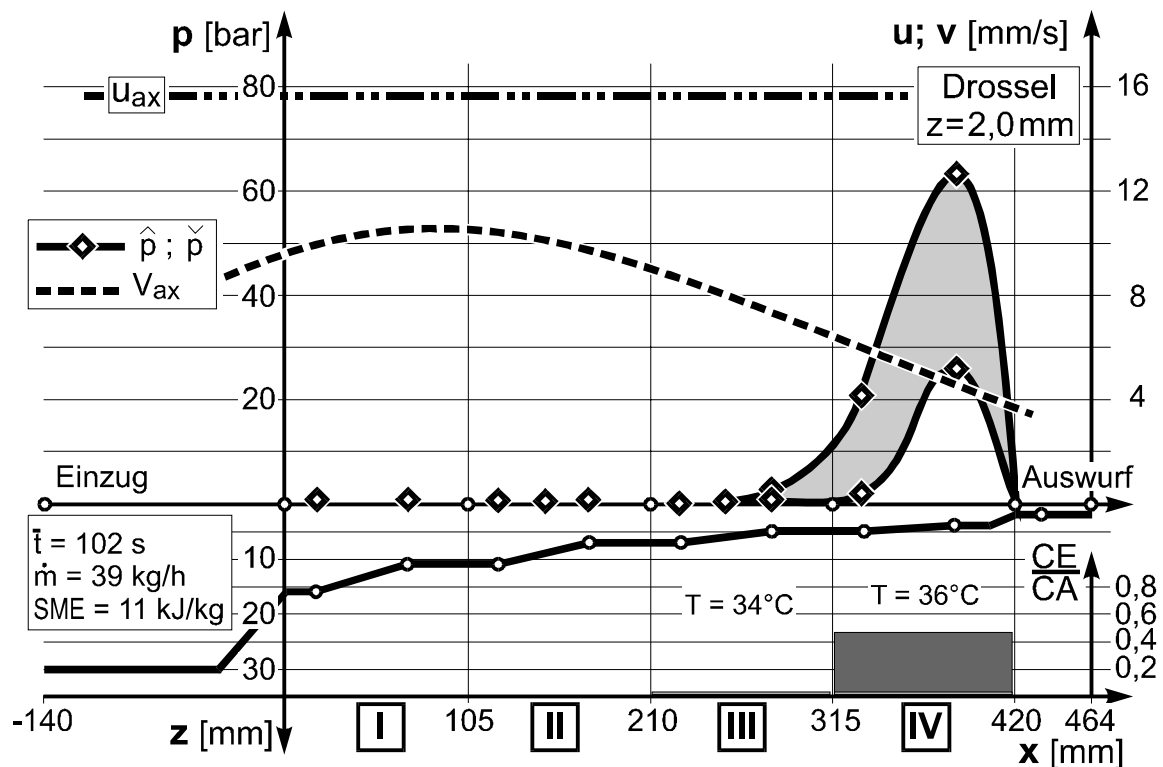


Abb. 3-8: Schnecken-Experiment D 80-4, Schneckenengeometrie gemäß Abb. 3-7; Enddrossel am Auswurf ($z = 2,0 \text{ mm}$); Schälrap; $XC = 1,13$; $xW = 4,5 \%$; $xH = 5 \%$; $\omega = 0,25$; $T_{\text{saat}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Die durch den Materialstau am Mundstück angestrebte rückwärts zum Einzug gerichtete Erhöhung des radialen Pressdrucks stellt sich nicht ein. Die Beeinflussung des Komprimatverhaltens und die Einleitung des Expulsat-abflusses über die gesamte Seiherlänge werden mit der eingesetzten Pressen-konfiguration nicht erreicht.

3.1.4 Die Helixgeometrie mit unterbrochenem Schneckensteg

Der Einsatz einer Helixgeometrie mit geschlossenem Schneckensteg führt auch in Kombination mit verschiedenen Seiherkonfigurationen zur Beeinflussung der Komprimatbewegung nicht zu einer für einen Expulsat-abfluss ausreichenden Kraftreaktion des Komprimats über die gesamte Seiherlänge. Aus dieser Erkenntnis drängt sich die Frage bezüglich der Wirkungsweise einer Helixgeometrie mit unterbrochenem Schneckensteg auf.

Im Folgenden soll daher die Funktion einer Helixgeometrie mit gleichmäßigen Unterbrechungen des Schneckenstegs untersucht werden. Als Unterbrechung ist dabei ein Fehlen des Schneckenstegs im Bereich der konischen Kompressions- oder der zylindrischen Relaxationselemente der

Kerngeometrie zu verstehen. In Abb. 3-9 sind eine 4-stufige und eine 6-stufige Schneckenengeometrie mit Unterbrechungen des Schneckenstegs im Bereich der konischen Schneckenelemente ($\kappa = 1$) abgebildet.

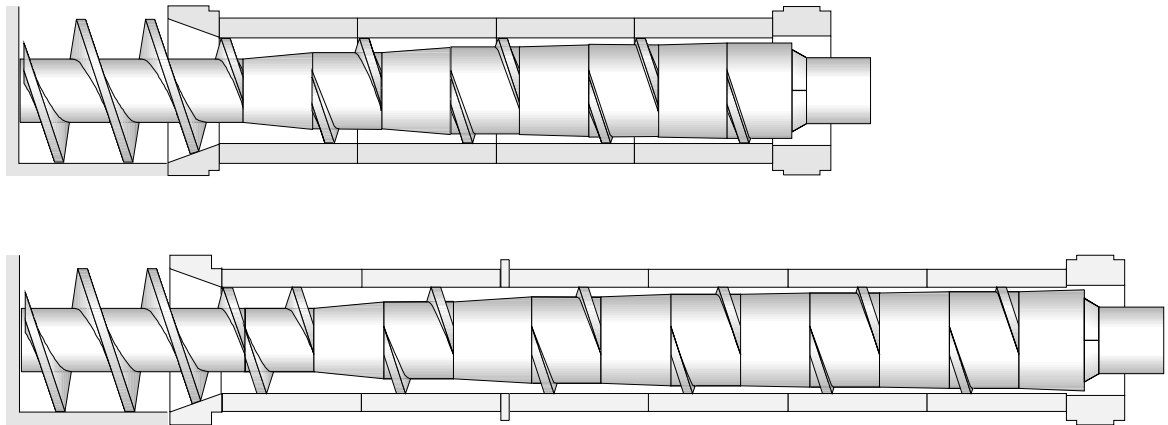


Abb. 3-9: 4-stufige und 6-stufige Schneckenengeometrie mit Unterbrechungen des Schneckenstegs im Bereich der konischen Schneckenelemente ($\kappa = 1$)

Das Ergebnis des 4-stufigen Schnecken-Experiments unter Einsatz einer Schneckenengeometrie gemäß Abb. 3-9 ist in Abb. 3-10 dargestellt. Das gemessene Profil der radialen Pressdrücke ist in den Zonen vor den Kompressionselementen durch einen deutlichen Anstieg geprägt, am Ende der Kompressionszonen findet ein Druckabfall statt. Das Niveau der gemessenen Drücke liegt bereits im zweiten Seiherfeld bei über 50 bar und steigt dann bis zum vierten Seiherfeld auf über 70 bar an. Die axiale Vorschubgeschwindigkeit des Komprimats ist durch einen ansteigenden Verlauf über die Seiherlänge gekennzeichnet. Das Maximum liegt vor dem Auswurf der Presskammer bei etwa der Hälfte der Vorschubgeschwindigkeit der Schneckenhelix. Daraus ergibt sich eine Verweilzeit des Komprimats von 102 Sekunden. Bereits im zweiten Seiherfeld stellt sich ein deutlicher Expulsatabfluss ein, der im dritten Feld sein Maximum erreicht und dann im vierten Feld wieder abfällt. Der Massendurchsatz ist mit 30 kg/h gegenüber den Experimenten mit geschlossenem Schneckensteg geringer. In Verbindung mit der deutlich höheren Kraftreaktion ergibt sich eine SME von 108 kJ/kg.

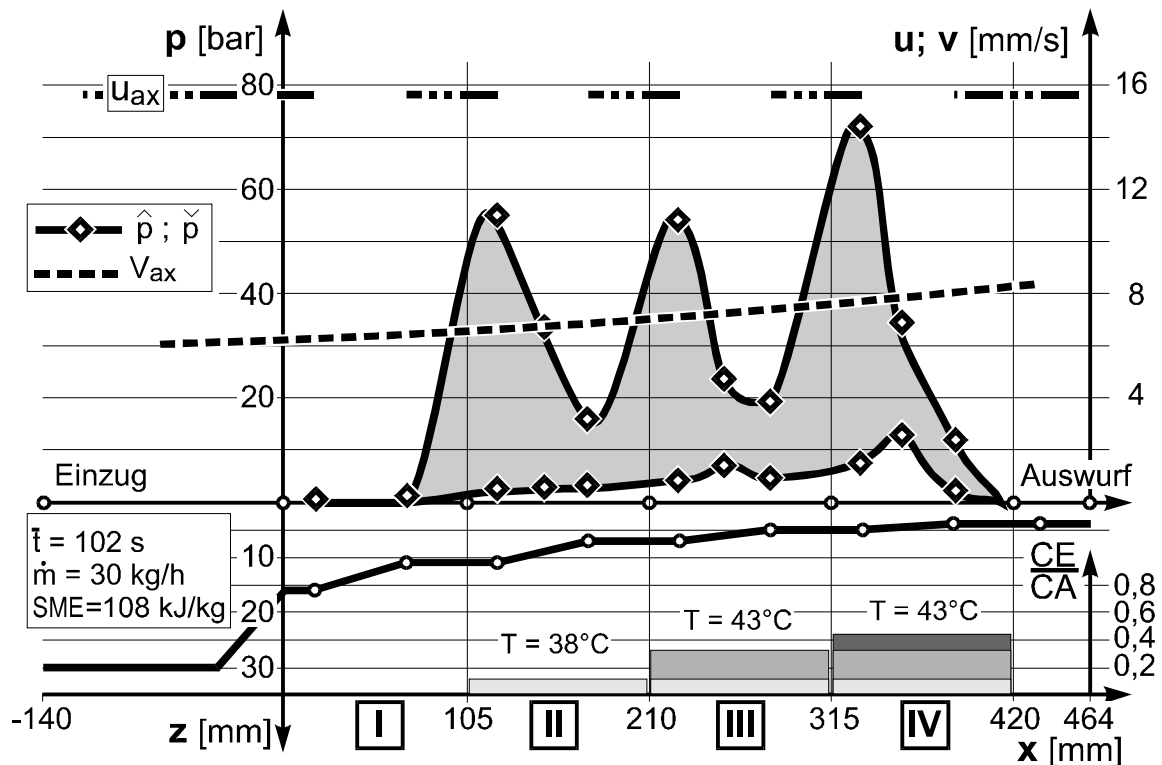


Abb. 3-10: Schneckengeometrie gemäß Abb. 3-9; Schälrap: $X_C = 1,16$; $x_W = 4,5 \%$; $x_H = 5 \%$; $\omega = 0,23$; $T_{\text{saat}} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$; $D = 0 \%$

Das Ergebnis des 6-stufigen Schneckens-Experiments ist in Abb. 3-11 dargestellt. Das gemessene Profil der radialen Pressdrücke ist in den Zonen vor den Kompressionselementen ebenfalls durch einen deutlichen Anstieg geprägt. Am Ende der Kompressionszonen findet ein Druckabfall statt. Das Niveau der gemessenen Drücke liegt bereits im zweiten Seiherfeld bei 40 bar und steigt dann bis zum fünften Seiherfeld auf über 60 bar an. Im sechsten Seiherfeld ist ein Druckabfall zu verzeichnen. Die axiale Vorschubgeschwindigkeit des Komprimats ist durch einen leicht bogenförmigen Verlauf über die Seiherlänge gekennzeichnet. Das Maximum liegt im Bereich des zweiten und dritten Seiherfelds bei etwa der Hälfte der Vorschubgeschwindigkeit der Schneckenhelix. Die Verweilzeit liegt mit 109 Sekunden nur geringfügig über der Verweilzeit im 4-stufigen Experiment. Dem gegenüber steht aber ein deutlich höherer Massendurchsatz von 51 kg/h. Dieser Effekt ist wieder in Verbindung mit dem Expulsatabfluss zu sehen, der bereits im zweiten Seiherfeld einsetzt und bis zum sechsten Seiherfeld auf einem gleichmäßig hohen Niveau liegt. Der Massendurchsatz an Saat ergibt sich aus der Summe von durchgesetztem Feststoff und abgepresstem Fluid.

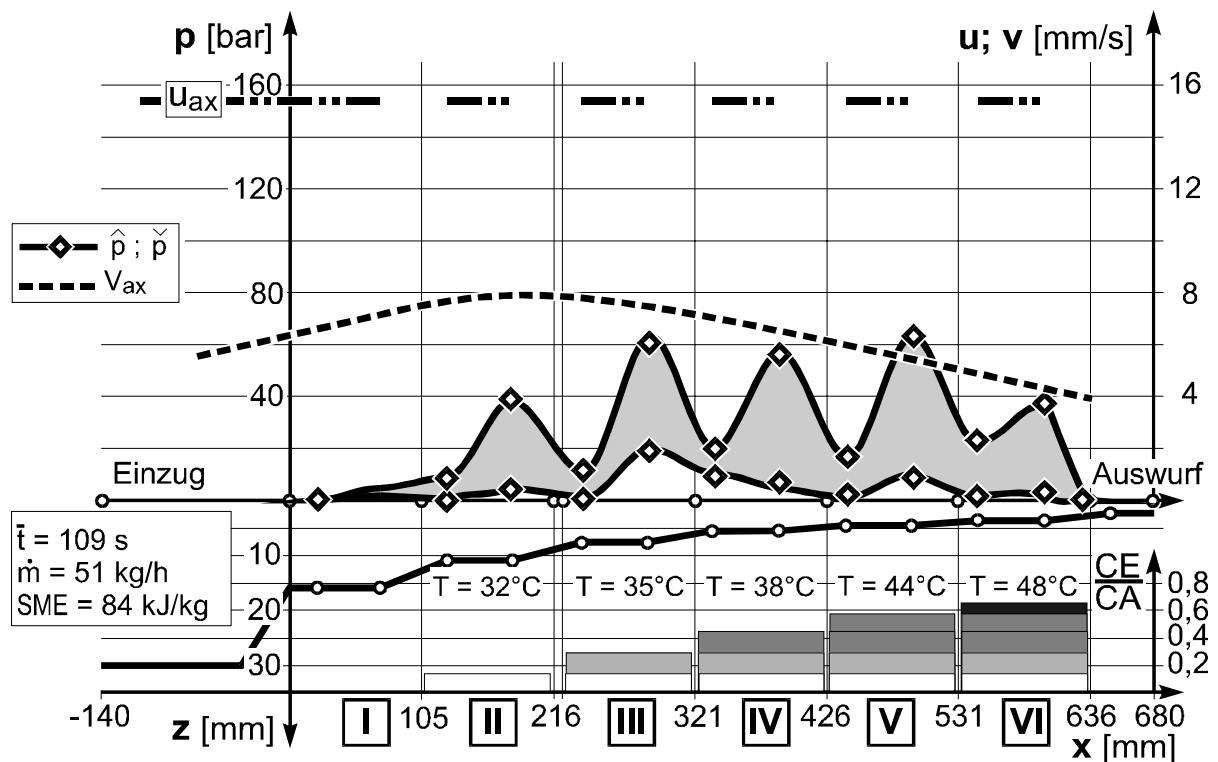


Abb. 3-11: Schnecken-Experiment D 80-6, Schnecken-Geometrie gemäß Abb. 3-9; Schälrap; XC = 1,13; xW = 4,5 %; xH = 5 %; $\omega = 0,25$; $T_{\text{saat}} = 25^\circ\text{C}$

Die in Tab. 3-4 und Tab. 3-5 aufgezeichneten Werte zeigen, dass die Funktion der gemäß Abb. 3-9 eingesetzten 4-stufigen und 6-stufigen Schnecken-Geometrie auch bei unterschiedlichen Drehzahlen und Komprimat-eigenschaften zu einer für die Einleitung eines Expulsatabflusses hinreichenden Kraftreaktion über die gesamte Länge der Seiherkammer führt

Tab. 3-4: Ergebnisse aus Schnecken-Experimenten mit 4-stufiger Schnecken-Geometrie gemäß Abb. 3-9 bei unterschiedlichen Drehzahlen und Komprimat-eigenschaften

xW [%]	xH [%]	ω [%]	D [%]	T_{saat} [°C]	n [min ⁻¹]	\dot{m} [kg/h]	t [s]	P_{max} [bar] *	SME [kJ/kg]	Expulsat [kg/h] *
4,5	5	25	0	25	12	26	161	0/35/39/30	83	0/1.7/3.0/2.4
6,0	5	85	0	25	12	22	177	5/20/25/15	65	0/0.3/3.1/1.8
4,5	5	25	0	25	18	30	103	0/55/55/72	108	0/2.3/4.5/2.9
6,0	5	85	0	25	18	24	115	5/25/28/31	72	0/0.9/1.4/1.3

* gemessen über die Seihfelder 1 (Einzug) bis 4 (Auswurf)

Tab. 3-5: Ergebnisse aus Schnecken-Experimenten
mit 6-stufiger Schneckenengeometrie gemäß Abb. 3-9
bei unterschiedlichen Drehzahlen und Komprimatigenschaften

xW [%]	xH [%]	ω [%]	D [%]	T _{saat} [°C]	n [min ⁻¹]	κ [kg/h]	t [s]	P _{max} [bar] *	SME [kJ/kg]	Expulsat [kg/h] *
4,5	5	25	0	25	12	34	x	8/40/55/ 60/70/40	100	0/3.2/3.2/ 2.6/2.4/1.1
6,0	5	85	0	25	12	27	x	7/30/42/ 58/80/45	88	0.1/2.8/2.3/ 2.2/1.8/0.8
4,5	5	25	0	25	18	51	109	5/40/60/ 57/62/40	84	0/4.1/4.2/ 3.8/3.8/2.0
6,0	5	85	0	25	18	38	x	7/30/38/ 40/45/38	57	0.1/3.1/2.5/ 2.1/1.8/1.6

* gemessen über die Seiherfelder 1 (Einzug) bis 6 (Auswurf)

Die Kombination der Schneckenengeometrien gemäß Abb. 3-9 mit einer Veränderung der Anstellwinkel σ der Seiherstäbe (Abb. 3-4) führt zu einer starken Verdichtung des Materials in der ersten Hälfte der Presskammer während des Anfahrvorgangs. Ein kontinuierlicher Massendurchsatz wird nicht erreicht. Die Wechselwirkung zwischen der hohen elastischen Rückstellkraft des Komprimats und dem erhöhten Reibwiderstand am Seiherumfang führt zu einer starken Erhöhung der Tangentialreibung. Die Folge ist ein hoher axialer Vorschub des sich immer weiter verdichtenden Materialpfropfens in den sich stetig verengenden Pressraum. Ab einer kritischen Dichte des Materials scheint eine weitere Kompression und in der Folge ein weiterer Vorschub des Materials nicht mehr möglich. Der Pressvorgang kommt zum Erliegen.

Zur umfassenden Beurteilung der Wirkungsweise einer Helixgeometrie mit unterbrochenem Schneckensteg ist ein weiteres Experiment erforderlich. Wird der Schneckensteg gemäß Abb. 3-9 unterbrochen, fördern die zylindrischen Schneckenelemente das Material in den sich durch die konischen Elemente verengenden Pressraum. Die Folge ist eine Verdichtung des Materials und eine entsprechende Kraftreaktion. Es stellt sich die Frage nach der Wirkungsweise bei einer Umkehrung der geometrischen Anordnung.

In Abb. 3-12 ist eine 4-stufige Schneckenengeometrie mit Unterbrechungen des Schneckenstegs im Bereich der zylindrischen Schneckenelemente ($\kappa = 0$) abgebildet.

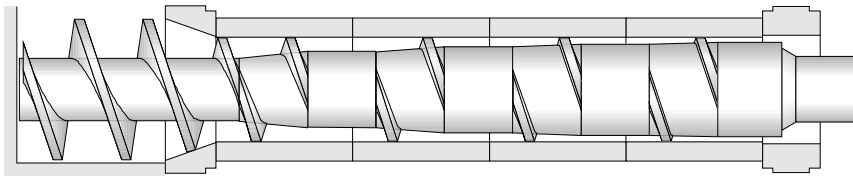


Abb. 3-12: 4-stufige Schneckengeometrie mit Unterbrechungen des Schneckenstegs im Bereich der zylindrischen Schneckenelemente ($\kappa = 0$)

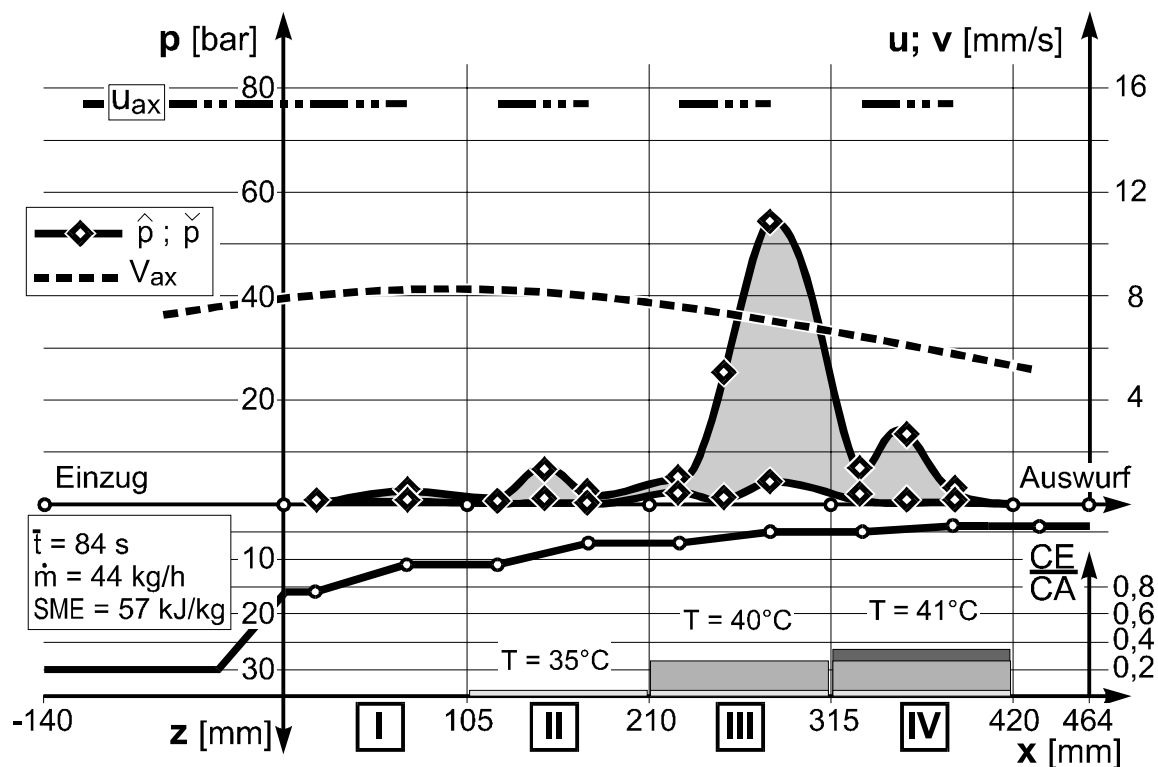


Abb. 3-13: Schnecken-Experiment D 80-4, Schneckengeometrie gemäß Abb. 3-12; Schälrap; XC = 1,13; xW = 4,5 %; xH = 5 %; $\omega = 0,25$; $T_{\text{saat}} = 25$ °C

Das in Abb. 3-13 dargestellte Pressergebnis ist durch ein Druckprofil mit ausgeprägten Maxima im Bereich der konischen Elemente gekennzeichnet. Dabei steigt der Druck bis zum dritten Seihfeld in ausgeprägten Spitzen bis auf ca. 55 bar an und fällt im vierten Seihfeld wieder auf ca. 15 bar ab. Es ist ein Expulsatabfluss zu registrieren, der proportional zu den gemessenen Drücken im dritten Seihfeld am höchsten ist. Die axiale Vorschubgeschwindigkeit des Komprimats ist durch einen bogenförmigen Verlauf über die Seihlänge gekennzeichnet, der im Bereich zwischen dem ersten und

zweiten Seiherfeld sein Maximum aufweist und sich in Bereichen höherer Drücke wieder verlangsamt. Der Massendurchsatz liegt mit 44 kg/h im Vergleich zu den Ergebnissen der 4-stufigen Experimente aus Tab. 3-4 deutlich höher, die Verweilzeit ist entsprechend kürzer, die SME ist deutlich geringer.

In Tab. 3-6 sind die Ergebnisse aus Experimenten mit einer Schnecken-geometrie gemäß Abb. 3-12 unter Variation von Drehzahl und Komprimat-eigenschaften aufgelistet. In allen Versuchen ist ein deutlicher Expulsat-abfluss zu verzeichnen. Mit höheren Drehzahlen ist eine Abnahme der Press-drücke und der abgepressten Menge an Expulsat zu verzeichnen. Bei einem höheren Aufschlussgrad stellen sich ebenfalls kleinere Pressdrücke und ein geringerer Expulsatabfluss ein. Hohe Pressdrücke bewirken einen höheren Massendurchsatz und eine kürzere Verweilzeit.

Tab. 3-6: Ergebnisse aus Schnecken-Experimenten mit 4-stufiger Schnecken-geometrie gemäß Abb. 3-12 bei unterschiedlichen Drehzahlen und Komprimat-eigenschaften

xW [%]	xH [%]	ω [%]	D [%]	T _{saat} [°C]	n [min ⁻¹]	\dot{m}_k [kg/h]	t [s]	P [bar] *	SME [kJ/kg]	Expulsat [kg/h] *
4,5	5	25	0	25	12	29	132	2/49/73/39	74	0/0.8/6.1/2.0
6,0	5	85	0	25	12	23	139	2/30/40/35	36	0/0.3/3.1/1.8
4,5	5	25	0	25	18	44	84	3/8/55/15	57	0/0.5/4.5/1.5
6,0	5	85	0	25	18	37	99	3/3/12/35	29	0/0.2/2.4/1.1

* gemessen über die Seiherfelder 1 (Einzug) bis 4 (Auswurf)

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass durch die geometrische Anordnung gemäß Abb. 3-12 das Komprimat durch die konischen Elemente in einen sich nicht weiter verengenden Pressraum ohne Steg hineingefördert wird. Da ein Anstieg der Kraftreaktion im Bereich der konischen Elemente zu verzeichnen ist, lässt dies darauf schließen, dass das Material über den zylindrischen Teil gegen den nächsten Konus mit Schneckensteg gefördert wird. Dem entgegenzuhalten ist, dass die Kombination aus Konus und Steg bei einer Schnecken-geometrie mit geschlossenem Steg nicht zu einem Expulsatabfluss führt, sondern erst in Kombination mit einer Helix-geometrie mit unterbrochenem Schneckensteg.

3.1.5 Die Helixgeometrie mit degressiver Stegsteigung

In technischen Schneckenengeometrien ist die Ausführung der Schneckenhelix mit einer degressiven Steigung des Schneckenstegs wie sie in Abb. 3-14 dargestellt ist, Stand der Technik.

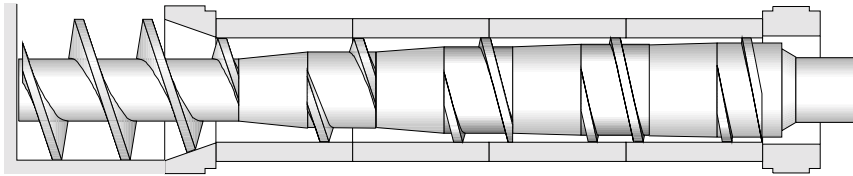


Abb. 3-14: 4-stufige Schneckenengeometrie mit Unterbrechungen des Schneckenstegs im Bereich der konischen Schneckenelemente ($\kappa = 1$) und einer degressiven Steigung des Schneckenstegs

In Abb. 3-15 ist das Ergebnis eines Schnecken-Experiments mit einer Schneckenengeometrie gemäß Abb.3-14 dargestellt.

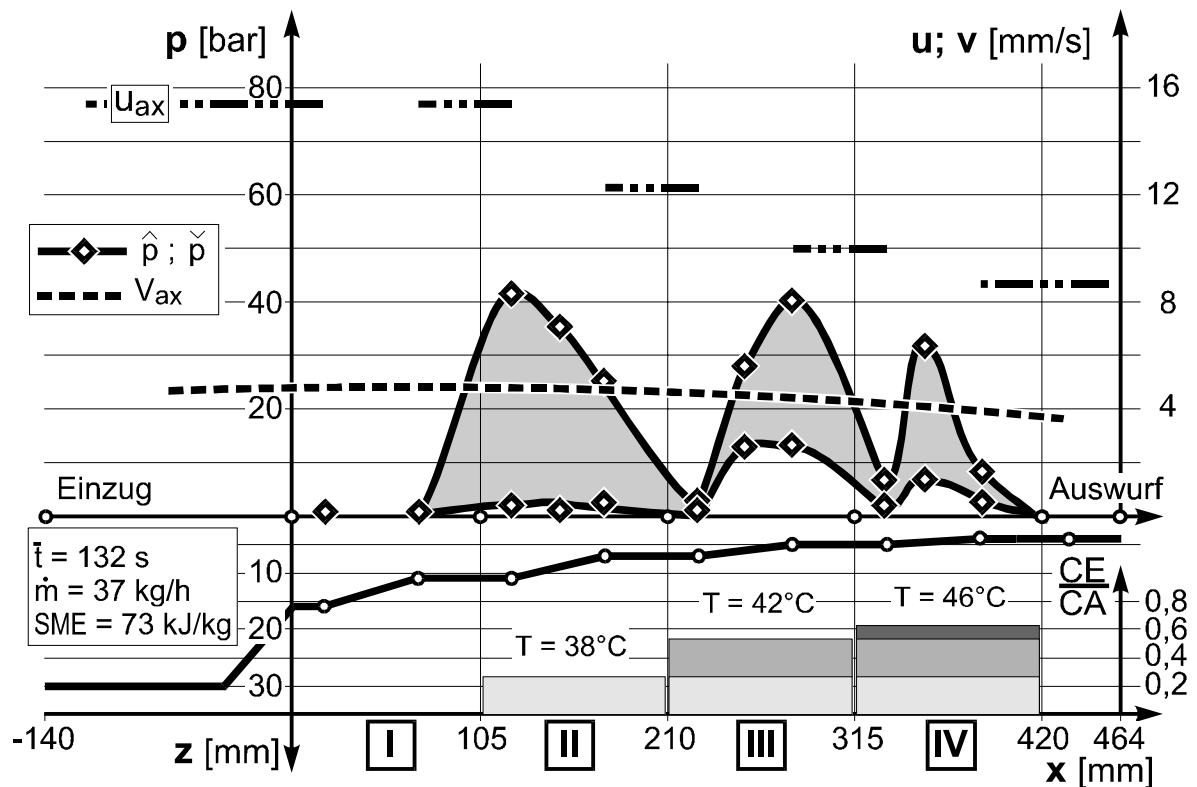


Abb. 3-15: Schnecken-Experiment D 80-4, Schneckenengeometrie gemäß Abb. 3-14; Schälrap; $\text{XC} = 1,13$; $\text{xW} = 4,5 \%$; $\text{xH} = 5 \%$; $\omega = 0,25$; $T_{\text{saat}} = 25^\circ\text{C}$

Gegenüber dem Pressergebnis mit konstanter Stegsteigung (Abb. 3-10) ist das Druckprofil durch Druckspitzen mit einer in Förderrichtung abnehmenden Breite der Basis gekennzeichnet. Das Druckniveau liegt bereits in der zweiten Pressstufe bei über 40 bar und fällt bis zur vierten Pressstufe nur geringfügig ab. Ein deutlicher Expulsatabfluss setzt entsprechend der registrierten Kraftreaktion in der zweiten Stufe ein, liegt in der dritten Stufe auf gleichem Niveau und fällt in der vierten Stufe deutlich ab.

Gegenüber dem Experiment mit konstanter Stegsteigung (Abb. 3-10) ist das Pressergebnis durch eine geringere axiale Vorschubgeschwindigkeit und eine längere Verweilzeit in Verbindung mit einem höheren Massendurchsatz geprägt. Dieser Effekt ist in Verbindung mit dem wesentlich höheren Massendurchsatz zu sehen. Die SME liegt auf wesentlich niedrigerem Niveau.

Als **Schlussfolgerungen für die nachfolgenden Experimente** ist festzustellen, dass eine Schnecken geometrie mit geschlossenem Schneckensteg auch in Kombination mit

- veränderten Reibungsbedingungen am Seiher,
- statischen Abstreifern am Eingang zur Seiherkammer,
- einer Drosselung des Materialstroms am Ausgang der Seiherkammer,
- und unter der Variation von Drehzahl und Materialeigenschaften

keine hinreichenden Kraftreaktionen des Komprimats zur Einleitung eines Expulsatabflusses über die Länge der Seiherkammer initiiert. Eine Unterbrechung des Schneckenstegs führt sowohl in den Bereichen der konischen Schneckenelemente als auch in den Bereichen der zylindrischen Schneckenelemente zu einem deutlichen Anstieg der Kraftreaktion des Komprimats schon zu Beginn der Seiherkammer und als Folge zu einem frühen Expulsatabfluss aus der Seiherkammer. Dabei zeichnet sich die Kombination von zylindrischem Förderelement und konischem Kompressions element gegenüber der umgekehrten Variante als deutlich effektiver aus. Die Geometrievariante mit der degressiven Stegsteigung soll zugunsten einer gleichmäßigen Materialförderung über die Seiherlänge nicht weiter verfolgt werden.

Für die nachfolgenden Schnecken-Experimente werden daher Geometrien gemäß Abb. 3-9 eingesetzt.

3.2 Zum Einfluss der Komprimatenschaften

Die Auswirkungen der Komprimatenschaften geschälter Rapssaat auf den kontinuierlichen Pressvorgang in der Schneckenpresse haben sich ansatzweise bereits in den vorangegangenen Untersuchungen gezeigt. Der Einfluss der einzelnen Komprimatparameter wird im Folgenden separat betrachtet. Ein Vergleich der Ergebnisse aus dem Linear- und dem Schnecken-Experiment soll eine Beurteilung des Materialverhaltens unter Kompression erleichtern. In den nachfolgenden Experimenten werden die in Tab. 3-7 aufgeführten Materialparameter innerhalb der dort angegebenen Spektren variiert.

3.2.1 Der Wassergehalt

In Abb. 3-16 ist das Ergebnis eines Linear-Experiments mit geschälter Rapssaat dargestellt. Auf Grund des hohen Wassergehalts von 7 % ist ein schneller Anstieg des Gesamtdrucks in der zweiten und dritten Pressstufe zu verzeichnen. Der Versuch muss vor dem Ende der dritten Stufe abgebrochen werden, da hier der Druck den zulässigen Messbereich überschreitet und das Komprimat in den Seiher extrudiert. In Verbindung mit dem dominanten Fluidruck, lässt auf eine schlechte Komprimatdrainage schließen.

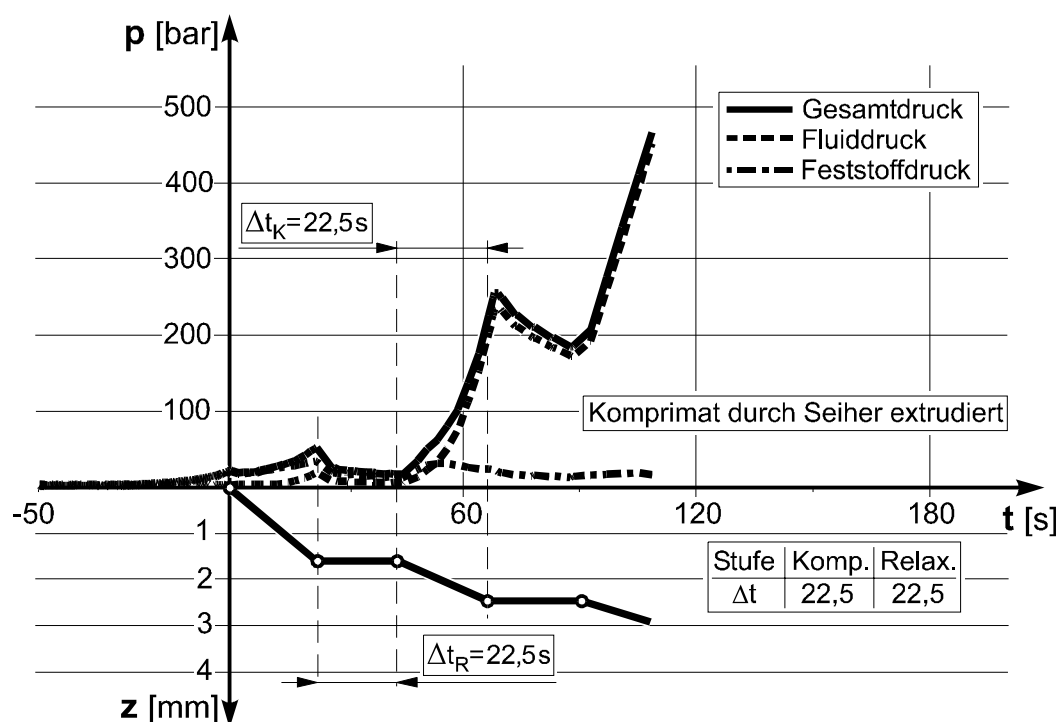


Abb. 3-16: Linear-Experiment: 4-stufiges Pressregime; geschälte Rapssaat: $X_C = 1,16$; $x_W = 7\%$; $x_H = 5\%$; $\omega = 0,23$; $T_{\text{saat}} = 25\text{ }^\circ\text{C}$; $D = 0\%$

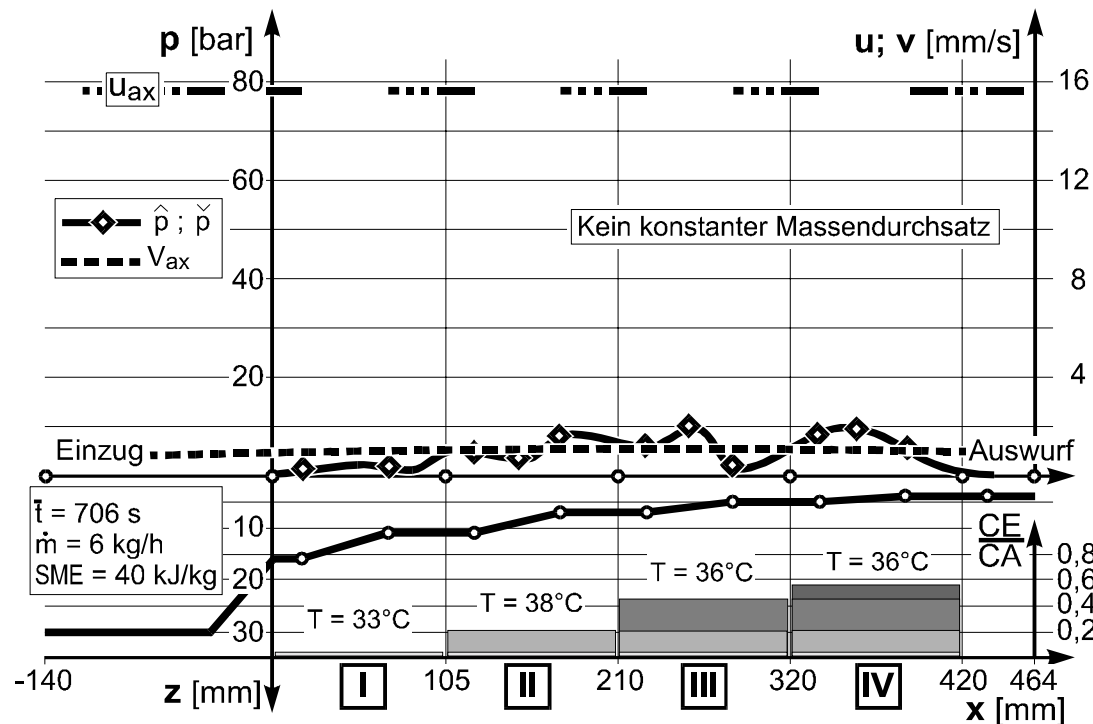


Abb. 3-17: Schneckens-Experiment D 80-4: geschälte Rapssaat: $XC = 1,16$; $xW = 7 \%$; $xH = 5 \%$; $\omega = 0,23$; $T_{\text{saat}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $D = 0 \%$

Das in Abb. 3-17 dargestellte Ergebnis aus einem 4-stufigen Schneckens-Experiment ist von einem instationären Prozesszustand mit einer extrem hohen Verweilzeit und einem entsprechend geringen Massendurchsatz geprägt. Die stark pulsierenden Pressdrücke liegen im Mittel auf einem sehr niedrigen Niveau. Das stark plastische Material ist nicht in der Lage die nötigen Rückstellkräfte für einen axialen Feststofftransport aufzubringen. Der hohe Entölungsgrad mit den sehr geringen Expulsatablauftemperaturen ist trotz der schlechten Komprimatdrainage mit der sehr langen Verweilzeit und Pressdauer zu erklären.

Wird der Wassergehalt der Saat deutlich verringert ($xW = 4,5 \%$), ist im Linear-Experiment, dargestellt in Abb. 3-18, ein stufenweiser Anstieg des Gesamtdrucks bis auf ca. 160 bar festzustellen. Der Anteil des Feststoffdrucks ist dabei bis zum Beginn der letzten Pressstufe dominant und wird erst hier von dem Fluiddruck leicht überstiegen, was auf eine gute Komprimatdrainage schließen lässt. Die Darstellung des Schneckens-Experiments in Abb. 3-10 zeigt nach der Vorverdichtung in der ersten Pressstufe einen starken Anstieg des radialen Gesamtdrucks bis auf ca. 73 bar in der vierten Stufe. Ab der zweiten Stufe setzt der Expulsatabfluss ein, der in der dritten Stufe am größten ist und in der vierten Stufe wieder abnimmt. Der Druckabfall in den Relaxationszonen ist wesentlich ausgeprägter als im Linear-Experiment.

Die im Schnecken-Experiment erzielten Ergebnisse korrelieren mit den Ergebnissen aus dem Linear-Experiment. Die Feststoffmatrix zeigt bei einem erhöhten Wassergehalt ein zunehmend plastisches Materialverhalten unter Kompression. In der Schneckenpresse führt dieses Verhalten zu einer Minderung der Rückstellkräfte und des axialen Materialtransports.

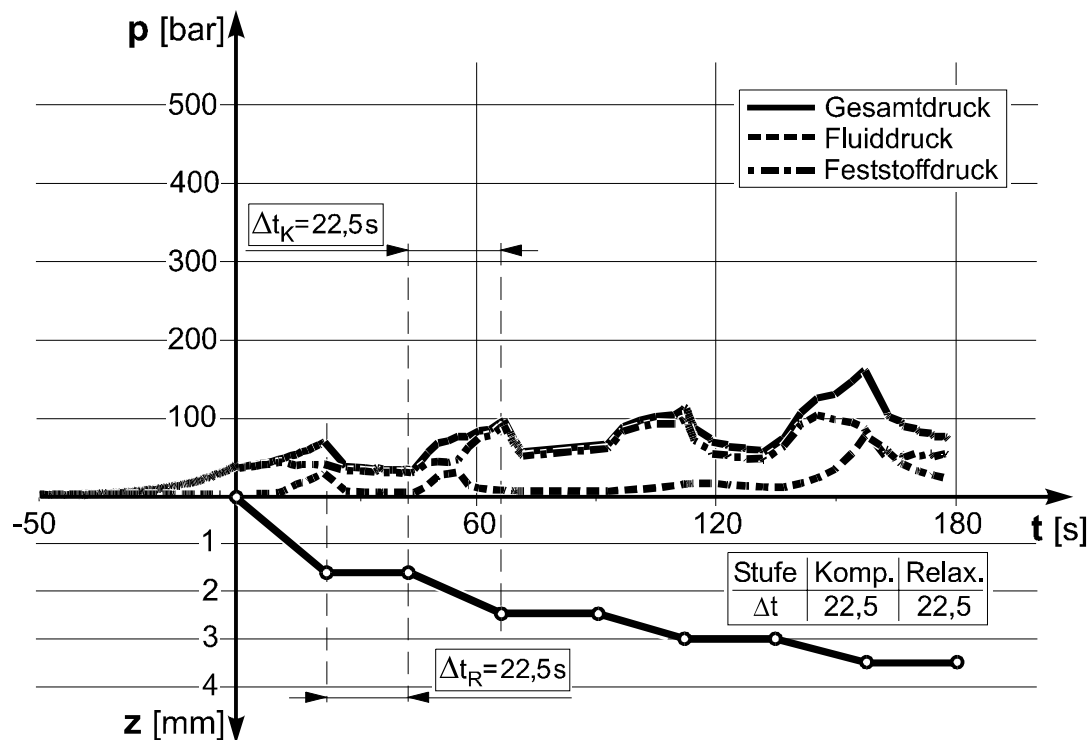


Abb. 3-18: Linear-Experiment; 4-stufiges Pressregime; geschälte Rapssaat; $XC = 1,16$; $xW = 4,5 \%$; $xH = 5 \%$; $\omega = 0,23$; $T_{\text{saat}} = 25^\circ\text{C}$; $D = 0 \%$

3.2.2 Der Hüllengehalt

In dem in Abb. 3-19 dargestellten Linear-Experiment wird Rapsbruch mit einem nativen Hüllengehalt und einem Wassergehalt von $xW = 6,5 \%$ eingesetzt. Der positive Effekt des nativen Hüllengehalts auf die Komprimat-drainage ist im Vergleich zu dem hüllenreduzierten Material deutlich zu sehen. Die gemessenen Drücke, insbesondere der Fluiddruck, bewegen sich trotz des hohen Wassergehalts auf einem niedrigen Niveau. Aus dem in Abb. 3-20 dargestellten Ergebnis des Schnecken-Experiments ist zu erkennen, dass die durch den Hüllengehalt verringerte Schüttdichte zunächst eine Ausdehnung der Vorkompression bis in die zweite Pressstufe bewirkt. Ab der dritten Stufe ist ein Anstieg des Radialdrucks bis auf 50 bar in der vierten Stufe zu verzeichnen. Die im Linear-Experiment festgestellte verbesserte Komprimat-

drainage bewirkt eine deutliche Verkürzung der Verweilzeit und eine Erhöhung des Massendurchsatzes auf Grund der gestiegenen Rückstellkräfte.

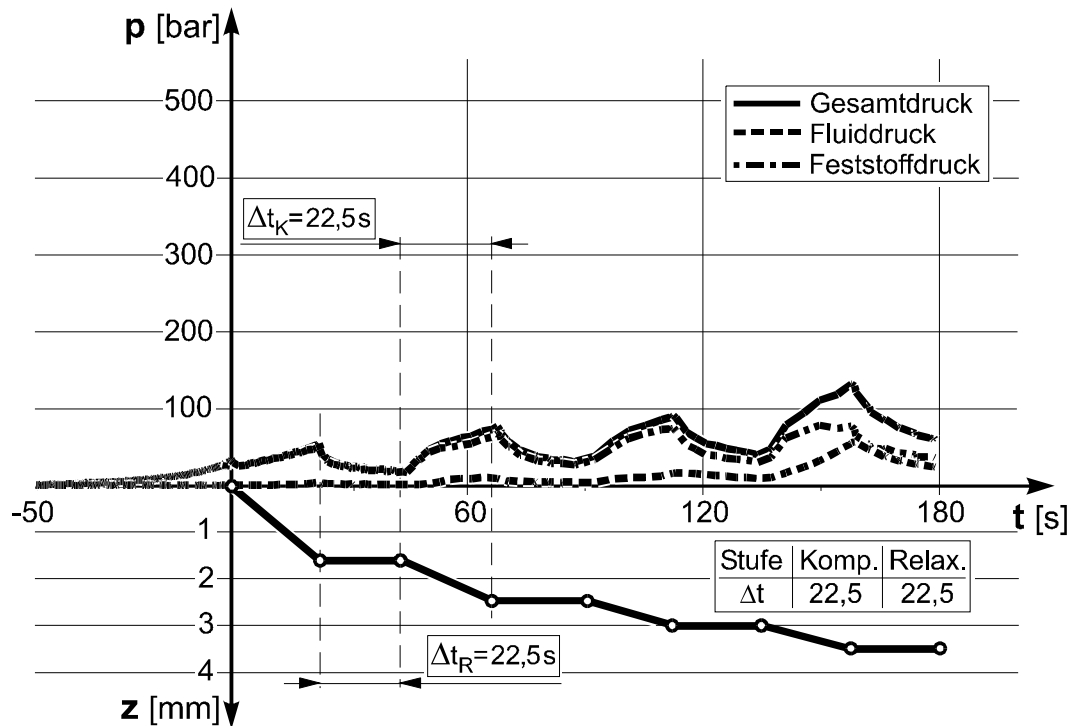


Abb. 3-19: Linear-Experiment; 4-stufiges Pressregime; Rapsbruch; $X_C = 0,92$; $x_W = 6,5 \%$; $x_H = 17 \%$; $\omega = 0,23$; $T_{saat} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$; $D = 0 \%$

Die in Tab. 3-7 aufgeführten Pressergebnisse lassen im Vergleich ebenfalls auf die positive Wirkung der Rapshüllen bezüglich der Press-eigenschaften schließen. Obwohl bei einem Wassergehalt von 7 % eine deutliche Reduzierung der Pressdrücke und auf Grund der geringeren Rück-stellkräfte auch ein Rückgang des Massendurchsatzes festzustellen ist, lässt sich das Material in der Schneckenpresse verarbeiten.

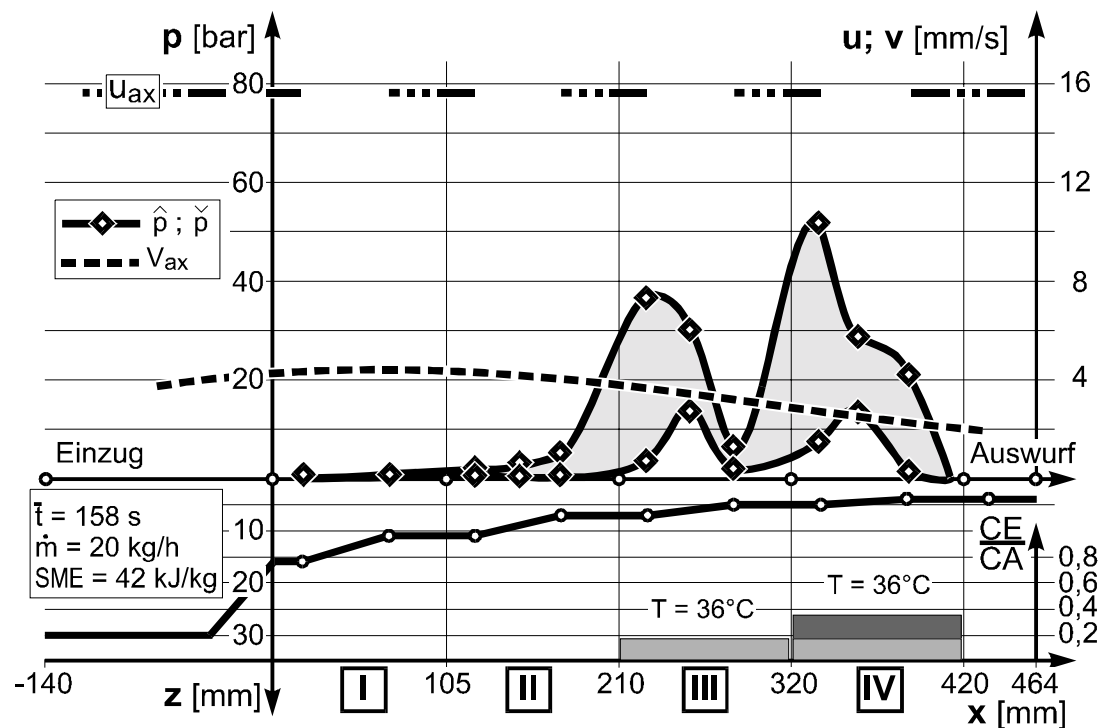


Abb. 3-20: Schnecken-Experiment D 80-4; Rapsbruch; $XC = 0,92$; $xW = 6,5 \%$; $xH = 17 \%$; $\omega = 0,23$; $T_{\text{saat}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $D = 0 \%$

Tab. 3-7: Schnecken-Experiment D 80-4:
Wirkung eines nativen Hüllengehalts auf das Pressergebnis
bei unterschiedlichen Wassergehalten

xW [%]	xH [%]	ω [%]	D [%]	T_{saat} [$^{\circ}\text{C}$]	P [bar] *	T_{Expul} [$^{\circ}\text{C}$] *	\dot{m} [kg/h]	XC_S []	Phos [ppm]	FFA [%]
2,9	17	25	0	25	0/2/12/22	- / - /38/46	27	0,56	6,3	0,36
7,0	17	25	0	25	0/1/24/26	- / - /32/35	18	0,56	8,5	0,23

* gemessen über die Seiherfelder 1 (Einzug) bis 4 (Auswurf)

3.2.3 Der Aufschlussgrad

Bei einem Wassergehalt der flockierten Saat von $xW = 6 \%$ ist im Linear-Experiment, dargestellt in Abb. 3-21, ein sehr niedriges Druckniveau zu verzeichnen. Der gegenüber dem Schälrap erhöhte Aufschlussgrad kompensiert die negativen Auswirkungen eines hohen Wassergehalts auch bei reduziertem Hüllengehalt. Die positive Beeinflussung der Komprimatdrainage drückt sich vor allem in dem sehr niedrigen Fluiddruck aus.

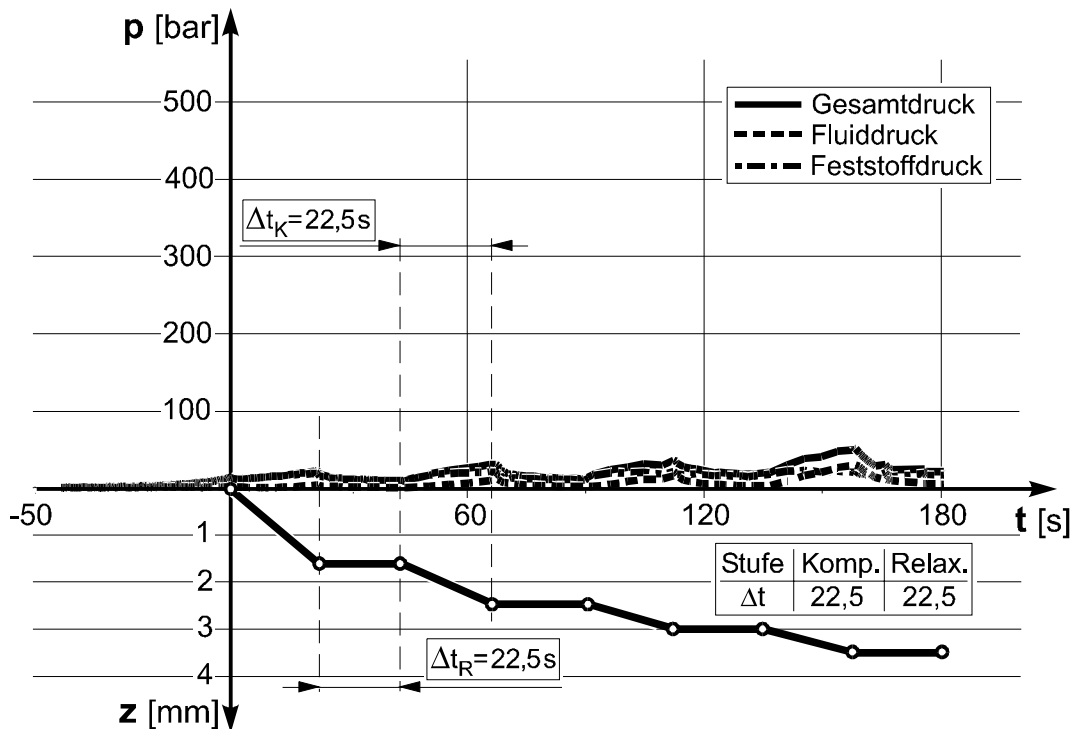


Abb. 3-21: Linear-Experiment; 4-stufiges Pressregime; geschälte Rapsflocken; $XC = 1,13$; $xW = 6,0 \%$; $xH = 5 \%$; $\omega = 0,85$; $T_{\text{saat}} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$; $D = 0 \%$

Im Schnecken-Experiment, dargestellt in Abb. 3-22, sind bei der Verarbeitung von hüllenreduzierten Rapsflocken mit einem Wassergehalt von $xW = 6 \%$ ebenfalls reduzierte Pressdrücke und Ölablauftemperaturen zu verzeichnen. Gegenüber dem Rapsbruch ist wie beim Schälrapr die erforderliche Vorverdichtung bereits nach der ersten Pressstufe erreicht. Der Expulsatabfluss fällt gegenüber dem Schälrapr und dem Rapsbruch deutlich geringer aus.

Der positive Effekt eines erhöhten Aufschlussgrads ist auch im direkten Vergleich der Pressergebnisse aus zwei Schnecken-Experimenten in Tab. 3-8 zu erkennen. Bei annähernd gleich hohen Wassergehalten sind bei einem erhöhten Aufschlussgrad deutlich höhere Pressdrücke und ein wesentlich höherer Materialdurchsatz festzustellen. Die gute Entölung des nur gering aufgeschlossenen Materials ist durch den sehr geringen Massendurchsatz und der folglich hohen Verweilzeit zu erklären.

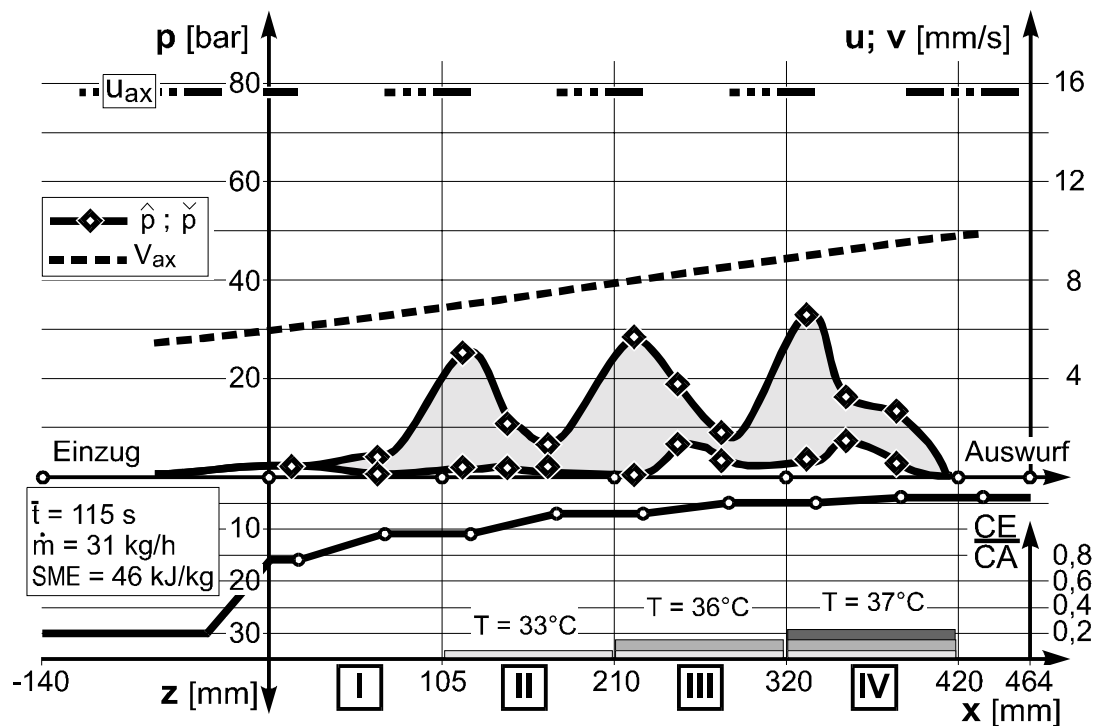


Abb. 3-22: Schnecken-Experiment D 80-4; geschälte Rapsflocken;
XC = 1,13; xW = 6,0 %; xH = 5 %; ω = 0,85; T_{saat} = 25 °C;
D = 0 %

Tab. 3-8: Schnecken-Experiment D 80-4: Wirkung eines höheren Aufschlussgrads auf das Pressergebnis bei unterschiedlichen Wassergehalten von hüllenreduzierter Rapssaat

xW [%]	xH [%]	ω [%]	D [%]	T_{saat} [°C]	P [bar] *	T_{Expul} [°C] *	\dot{m} [kg/h]	XC _S []	Phos [ppm]	FFA [%]
7,4	5	85	0	25	3/15/21/32	- /27/30/33	18	0,61	9,8	0,46
7,5	5	25	0	25	0/8/10/10	33/38/36/36	5	0,35	7,3	0,31

* gemessen über die Seihfelder 1 (Einzug) bis 4 (Auswurf)

Den Werten in Tab. 3-9 ist zu entnehmen, dass bei einem Material mit nativem Hüllengehalt die positive Wirkung eines erhöhten Aufschlussgrads weniger ins Gewicht fällt; der Einfluss der elastischen Eigenschaften der Hüllen ist dominant.

Tab. 3-9: Schnecken-Experiment D 80-4: Wirkung eines höheren Aufschlussgrads auf das Pressergebnis bei unterschiedlichen Wassergehalten von Rapsbruch mit nativem Hüllengehalt

xW [%]	xH [%]	ω [%]	D [%]	T _{saat} [°C]	P [bar] *	T _{Expul} [°C] *	\dot{m} [kg/h]	XC _S []	Phos [ppm]	FFA [%]
6,9	17	85	0	25	0/16/18/23	- / - /33/34	12	0,38	10,3	0,58
7,0	17	25	0	25	0/1/24/26	- / - /32/35	18	0,56	8,5	0,23

* gemessen über die Seiherfelder 1 (Einzug) bis 4 (Auswurf)

3.2.4 Die Presstemperatur

In Tab. 3-10 werden die Pressergebnisse aus Schnecken-Experimenten unter dem Einfluss verschiedener Presstemperaturen miteinander verglichen. Bei höheren Temperaturen ist auf Grund der plastischeren Feststoffmatrix ein Absinken der Pressdrücke festzustellen. Dieser negative Effekt bewirkt aber nur eine Reduzierung der Pressdrücke. Auf Grund der niedrigeren Ölviskosität und des dadurch geringeren Presswiderstands wird der Massendurchsatz im Gegenzug leicht erhöht.

Tab. 3-10: Schnecken-Experiment D 80-4: Wirkung einer höheren Presstemperatur auf das Pressergebnis bei unterschiedlichen Wasser- und Hüllengehalten von gebrochener Rapssaat

xW [%]	xH [%]	ω [%]	D [%]	T _{saat} [°C]	P [bar] *	T _{Expul} [°C] *	\dot{m} [kg/h]	XC _S []	Phos [ppm]	FFA [%]
3,7	5	25	100	25	0/3/28/25	- /36/41/44	37	0,66	62,0	0,36
3,7	5	25	100	70	0/4/11/9	- / - /58/60	43	0,78	78,4	0,45
3,9	17	25	100	25	1/2/11/22	- / - /36/37	29	0,75	92,9	0,44
4,2	17	25	100	70	1/4/10/14	- / - /55/55	37	0,78	158,9	0,59

* gemessen über die Seiherfelder 1 (Einzug) bis 4 (Auswurf)

Anhand der Ergebnisse in Tab. 3-11 ist zu erkennen, dass der im Linear-Experiment festgestellte negative Einfluss einer hohen Presstemperatur in Verbindung mit einem hohen Wassergehalt durch einen nativen Hüllengehalt wieder ausgeglichen werden kann.

Tab. 3-11: Schnecken-Experiment D 80-4: Wirkung einer höheren Presstemperatur auf das Pressergebnis bei unterschiedlichen Wassergehalten von Rapsbruch mit nativem Hüllengehalt

xW [%]	xH [%]	ω [%]	D [%]	T _{saat} [°C]	P [bar] *	T _{Expul} [°C] *	\dot{m} [kg/h]	XC _S [%]	Phos [ppm]	FFA [%]
4,2	17	25	100	70	1/4/10/14	- / - /55/55	37	0,78	158,9	0,59
5,6	17	25	100	70	0/8/13/5	- / - /54/57	32	0,75	87,9	0,49

* gemessen über die Seiherfelder 1 (Einzug) bis 4 (Auswurf)

3.2.5 Die Denaturierung

Anhand der Ergebnisse in Tab. 3-12 ist zu erkennen, dass eine zusätzliche Denaturierung einer flockierten Saat nur noch geringe Verbesserungen bezüglich des Pressergebnisses bringt. Leicht höhere Drücke bewirken einen höheren Massendurchsatz. Die Restölbeladung im Schilfer wird davon aber kaum beeinflusst. Auffällig ist der deutlich höhere Phosphorgehalt im Öl (Vgl. auch Tab. 3-10 und Tab. 3-11).

Tab. 3-12: Schnecken-Experiment D 80-4: Wirkung einer Denaturierung der Feststoffmatrix bei der Verarbeitung von Rapsbruch

xW [%]	xH [%]	ω [%]	D [%]	T _{saat} [°C]	P [bar] *	T _{Expul} [°C] *	\dot{m} [kg/h]	XC _S []	Phos [ppm]	FFA [%]
2,4	5	85	0	50	0/5/30/29	- /48/52/50	33	0,78	5,7	0,36
2,6	5	85	100	50	3/23/26/37	- /45/51/50	37	0,80	62,0	0,49

* gemessen über die Seiherfelder 1 (Einzug) bis 4 (Auswurf)

Als **Schlussfolgerungen für die nachfolgenden Experimente** ist festzustellen, dass sich im Vergleich der Versuchsergebnisse aus Linear- und Schnecken-Experiment korrelierende Effekte zeigen. Der Einfluss der Parameter Wassergehalt, Hüllengehalt und Aufschlussgrad auf das rheologische Verhalten des Komprimats unter Kompression ist deutlich erkennbar.

- Das mit steigendem Wassergehalt zunehmend plastische Verhalten des Kernfleischs unter Kompression führt in der Schneckenpresse zu abnehmenden Rückstellkräften. Die Folgen einer hohen Komprimatnässe sind abnehmende Pressdrücke, ein geringerer Massendurchsatz und längere Verweilzeiten.

- Die Hüllen haben unter Kompression ausgeprägt elastische Eigenschaften haben, die nahezu unabhängig vom Wassergehalt sind. Dieses Verhalten zeigt sich in den Ergebnissen des Linear- und des Schnecken-Experiments. Ein nativer Hüllengehalt, verantwortlich für eine gute Komprimatdrainage und hohe Rückstellkräfte, bewirkt steigende Pressdrücke und einen steigenden Massendurchsatz mit entsprechend kurzen Verweilzeiten.
- Ein hoher Aufschlussgrad führt bei hohen Wassergehalten zu einer Verbesserung der Komprimatdrainage. Der fehlende innere Zellendruck, der Turgor, führt allerdings zu niedrigeren Pressdrücken und geringeren Rückstellkräften. Die Folge ist ein geringerer Expulsatabfluss bei geringeren Presstemperaturen.

Gegenüber der dominanten Wirkung von Hüllengehalt, Wassergehalt und Aufschlussgrad haben die Parameter Presstemperatur und Denaturierung einen deutlich geringeren Einfluss auf das Materialverhalten unter Kompression und auf das Pressergebnis. Charakteristisch ist der negative Effekt auf die Qualität des Öls.

Basierend auf den Ergebnissen werden zur Eingrenzung des Spektrums an Komprimateneigenschaften für die folgenden Untersuchungen exemplarisch drei Komprimat ausgewählt, deren Hauptcharakteristika Tab. 3-13 zu entnehmen sind. Entsprechend ihres Einflussgrades steht dabei die Variation von Hüllengehalt und Aufschlussgrad bei einer optimalen Materialnässe bezüglich Rückstellkraft und Komprimatdrainage im Vordergrund. Die Parameter Temperatur und Denaturierung sollen nicht weiter verfolgt werden.

Tab. 3-13: Komprimateneigenschaften zur Untersuchung des kontinuierlichen Pressvorgangs unter Variation von Geometrieparametern. Variation von Hüllengehalt und Aufschlussgrad bei einer für die Rückstellkraft und die Komprimatdrainage optimalen Materialnässe

Komprimat	XC []	xW [%]	xH [%]	Aufschlussgrad [%]
Rapsbruch	0,92 ± 0,02	6,5 ± 0,1	17,5 ± 2,5	23
Schälrap	1,16 ± 0,03	4,5 ± 0,1	5 ± 2	25
Schälflöcken	1,16 ± 0,03	6,0 ± 0,1	5 ± 2	85

3.3 Zum Betriebszustand einer Schneckenpresse

Bezüglich des stationären Betriebszustands ist zwischen zwei verschiedenen Betriebsphasen zu differenzieren. Im ersten Fall ist zum Erreichen eines möglichen stationären Betriebszustands der instationäre Vorgang des Anfahrens zu durchlaufen. Im zweiten Fall ist zu überprüfen, ob der erreichte Betriebszustand auch tatsächlich einen stationären bzw. quasistationären Charakter hat.

3.3.1 Das Anfahrverhalten bis zum Betriebspunkt

Zur Überprüfung des Anfahrverhaltens bis zum Erreichen eines Betriebspunkts ist eine Auswahl an geeigneten Kontrollparametern zu treffen. Dabei ist grundsätzlich zwischen Parametern zu unterscheiden, die mit der zur Verfügung stehenden Versuchstechnik online sind, also während der Versuchsdurchführung kontrolliert werden können und Parametern, die offline sind, also erst in der Versuchsnachbereitung zu überprüfen sind. Anzustrebendes Ziel ist die Durchführung experimenteller Untersuchungen im konstanten Betriebszustand. Das bedeutet, dass das Erreichen dieses konstanten Betriebszustands im Verlauf des Anfahrvorgangs online kontrolliert werden muss. Es ist zu überprüfen, über welche Prozessgrößen das Erreichen des Betriebszustands festgelegt werden kann und ob ein online-Verfahren hier hinreichend aussagekräftig ist.

Auf Grund der Reibung und der entstehenden Reibungswärme ist anzunehmen, dass die Presse im Betriebspunkt in einem thermischen Gleichgewicht steht. Ein geeigneter Kontrollparameter ist daher die Temperatur des ablaufenden Expulsats und ihre Veränderung vom kalten Anfahren bis zur konstanten Betriebstemperatur.

Mit dem langsamen Füllen der Presskammer wird sich auch die aufzubringende Pressarbeit und folglich die vom Pressenmotor aufgenommene elektrische Leistung ändern. Diese kann hinreichend genau online kontrolliert werden.

Da das Erreichen konstanter Massenströme eine Voraussetzung für experimentelle Untersuchungen im Betriebspunkt der Presse ist, ist die Kontrolle der Massenströme eine notwendige Bedingung zur Bestimmung des Betriebspunkts. Die Veränderungen der Massenströme können mit der eingesetzten Versuchstechnik aber nur offline überprüft werden.

Als "äußere Einflussgrößen" wurden im Arbeitsmodell die Geometrie und die Drehzahl der Schneckenwelle postuliert. Das Erreichen eines konstanten Betriebspunkts soll daher im Folgenden unter Variation der Wellendrehzahl und der Kerngeometrie der Schneckenwelle untersucht werden. Als dritter Parameter wird das Anfahrverhalten unter Variation der in Tab. 3-13 definierten Komprimateneigenschaften untersucht.

Die **Variation der Drehzahl** führt zu folgenden Ergebnissen:

Tab. 3-14: Schnecken-Experiment D 80-6:
Anfahrversuche unter Variation der Drehzahl

u_{ax} [mm/s]	κ	Komprimat	* P_{el} [kW]	* t' [min]	* T_E [°C]	* t [min]
5,25	0,5	Schälflocken	0,38	35	38	80
10,5	0,5	Schälflocken	0,6	15	39	50
15,75	0,5	Schälflocken	0,7	15	38	40

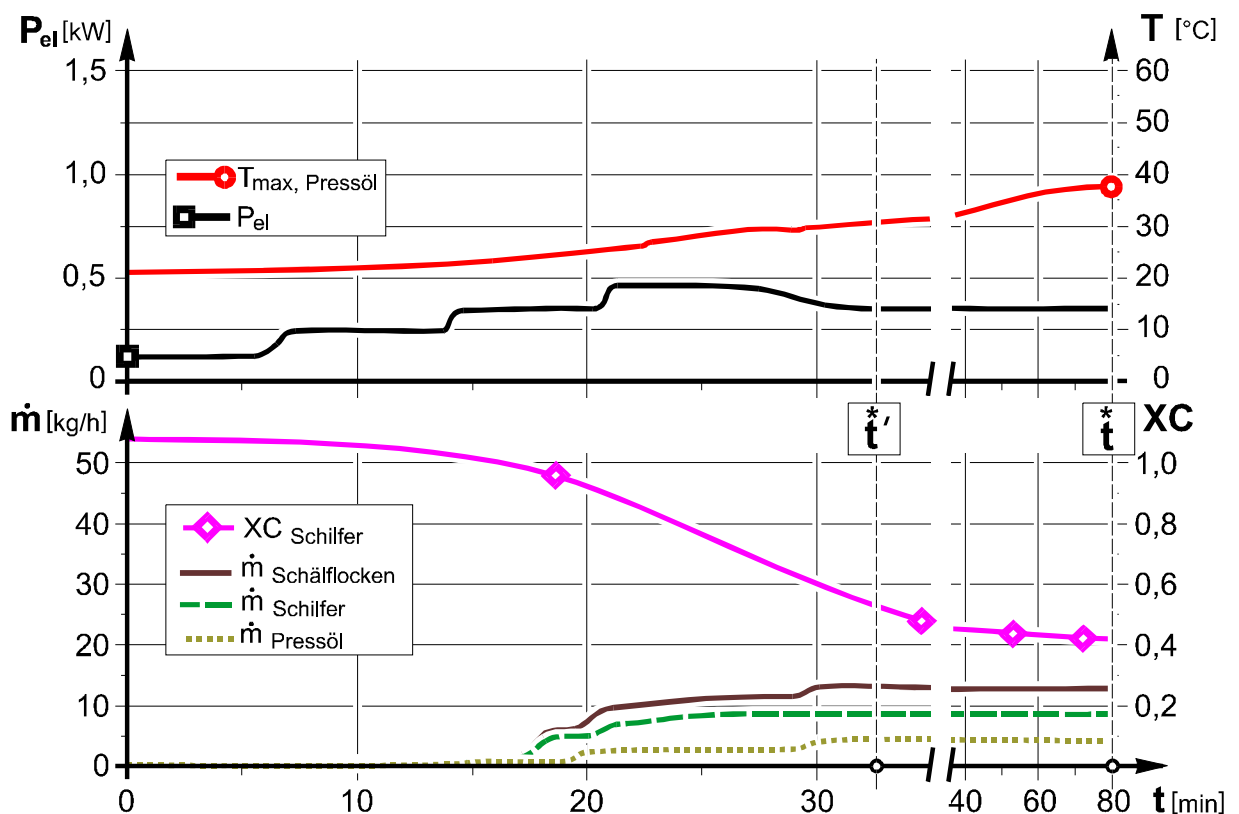


Abb. 3-23: Schnecken-Experiment D 80-6: Anfahrvorgang bei $n = 6 \text{ min}^{-1}$

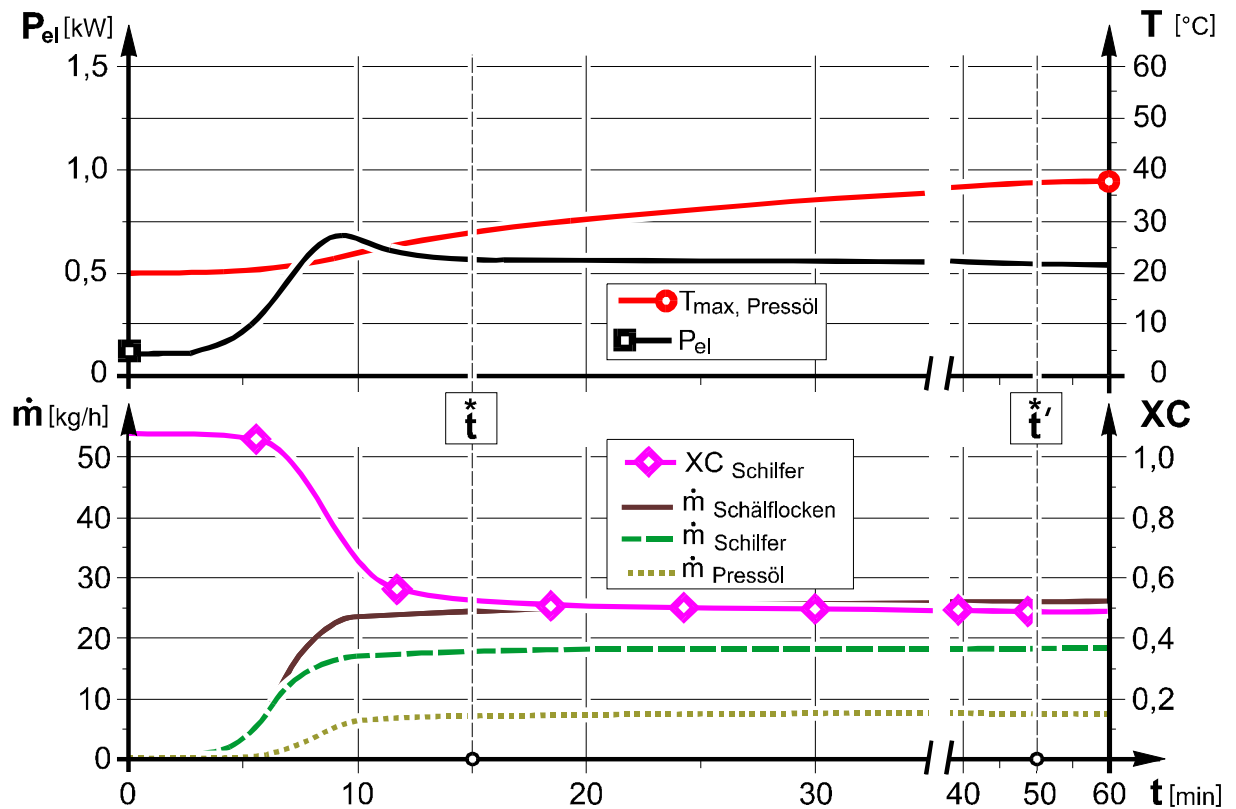


Abb. 3-24: Schnecken-Experiment D 80-6: Anfahrvorgang bei $n = 12 \text{ min}^{-1}$

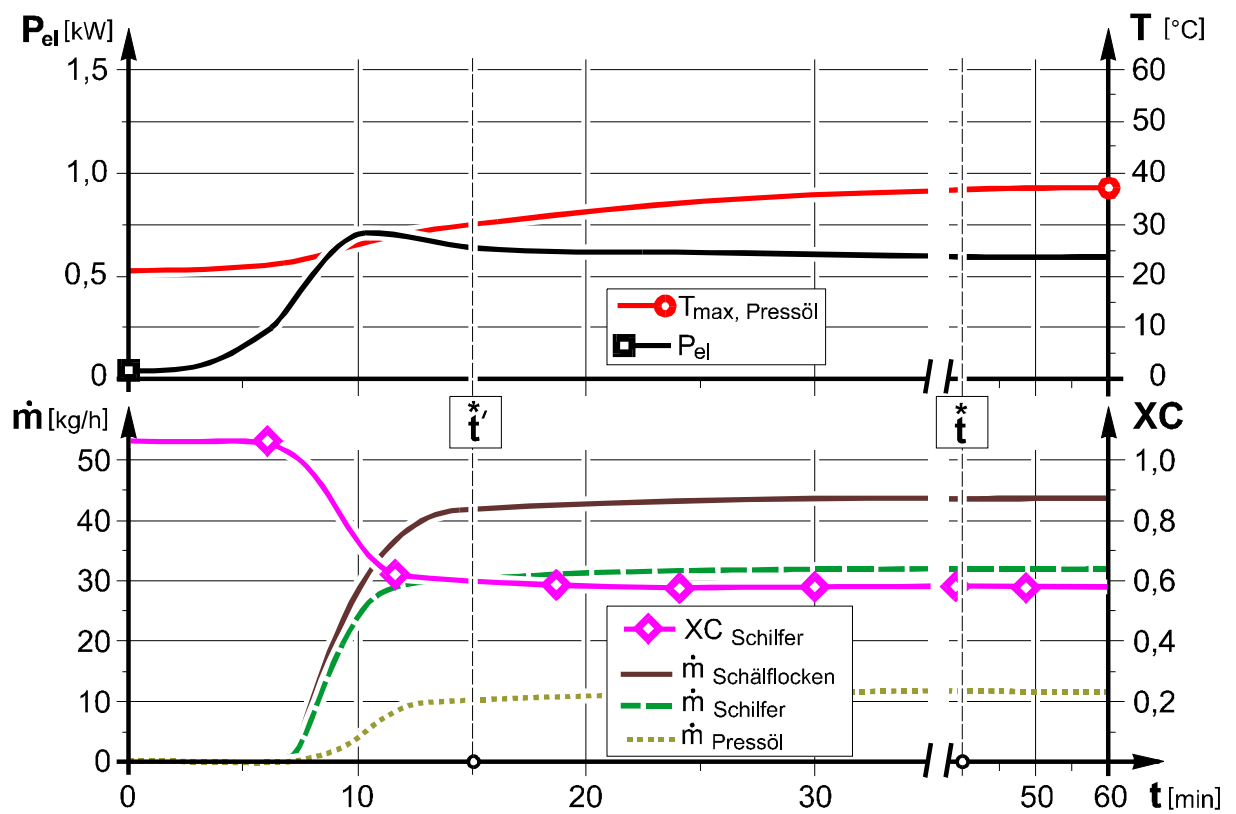


Abb. 3-25: Schnecken-Experiment D 80-6: Anfahrvorgang bei $n = 18 \text{ min}^{-1}$

Die Anfahrversuche wurden unter Variation der Drehzahl nach Tab. 3-14 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 3-23, Abb. 3-24 und Abb. 3-25 dargestellt. Im Verlauf des Anfahrvorgangs sind bezüglich der vom Antriebsmotor aufgenommenen elektrischen Leistung bei allen Drehzahlen ein Anstieg bis auf ein Maximum und anschließend ein Abfall auf ein konstantes Niveau festzustellen. Bei der sehr langsamen Drehzahl von $n = 6 \text{ min}^{-1}$ fällt in Abb. 3-23 ein stufenförmiger Anstieg der Leistung auf, der wahrscheinlich auf das sehr langsame und konsekutive Befüllen einzelner Zonen der Presskammer zurückzuführen ist; bei den höheren Drehzahlen erfolgt die Befüllung der einzelnen Zonen schneller und übergangsloser (Abb. 3-24 und Abb. 3-25). Eine konstante Leistungsaufnahme stellt sich im längsten Fall bereits nach ca. 35 Minuten ein ($n = 6 \text{ min}^{-1}$).

Die Temperatur des ablaufenden Expulsats steigt stetig an und erreicht nach maximal 80 Minuten ein konstantes Maximum ($n = 6 \text{ min}^{-1}$). Interessant ist, dass eine Abhängigkeit der Temperatur von der Drehzahl kaum festzustellen ist. Die aufgezeichneten Massenströme zeigen in Abhängigkeit von der Drehzahl ein unterschiedliches Verhalten. Mit steigender Drehzahl steigt der Durchsatz und erhöht sich die Restölbeladung XC im Schilfer; das Ergebnis ist durch zwei konkurrierende Effekte geprägt. Aus den Ergebnissen lassen sich bezüglich eines konstanten Betriebszustands zwei Zeitpunkte definieren:

- Zum Zeitpunkt t'^* sind mit dem Erreichen einer konstanten Leistungsaufnahme des Antriebsmotors auch die Einstellung konstanter Massenströme zu verzeichnen.
- Zum Zeitpunkt t^* erreicht das System auch sein thermisches Gleichgewicht. Erst in diesem Punkt stellt sich ein endgültiger stabiler Betriebszustand ein.

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass sowohl das Erreichen konstanter Massenströme als auch das Erreichen des endgültigen Gleichgewichts online über die Leistungsaufnahme des Antriebsmotors und die Temperaturveränderung des ablaufenden Expulsats kontrolliert werden können.

Unter **Variation der Komprimateneigenschaften** stellen sich qualitativ vergleichbare Ergebnisse zu den Versuchen unter Variation der Drehzahl ein. Veränderungen sind nur in der Quantität der einzelnen Parameter zu beobachten. Anhand der in Tab. 3-15 dargestellten Ergebnisse ist zu sehen, dass sich mit zunehmender Leistungsaufnahme, bedingt durch einen gering-

eren Aufschlussgrad und einen höheren Hüllengehalt, die zeitliche Distanz bis zum Erreichen konstanter Massenströme vergrößert. Parallel dazu ist mit höheren Leistungsaufnahmen eine höhere Ablauftemperatur des Expulsats und folglich ein längerer Zeitraum bis zum Erreichen des thermischen Gleichgewichts zu verzeichnen.

Tab. 3-15: Schnecken-Experiment D 80-6:
Anfahrversuche unter Variation der Komprimateneigenschaften

u_{ax} [mm/s]	κ	Komprimat	* P_{el} [kW]	* t' [min]	* T_E [°C]	* t [min]
10,5	0,5	Schälflocken	0,6	15	39	50
10,5	0,5	Schälrops	1,1	35	52	55
10,5	0,5	Rapsbruch	1,2	40	55	60

Unter **Variation der Kerengeometrie** stellen sich ebenfalls qualitativ vergleichbare Ergebnisse zu den Versuchen unter Variation der Drehzahl und der Komprimateneigenschaften ein. Veränderungen sind auch hier im Wesentlichen in der Höhe der gemessenen Werte zu beobachten. Den Werten in Tab. 3-16 ist zu entnehmen, dass eine Veränderung der Kerengeometrie kaum eine Veränderung im Anfahrverhalten bewirkt.

Tab. 3-16: Schnecken-Experiment, D 80-6:
Anfahrversuche unter Variation der Kerengeometrie

u_{ax} [mm/s]	κ	Komprimat	* P_{el} [kW]	* t' [min]	* T_E [°C]	* t [min]
10,5	> 0,1	Schälflocken	0,45	15	39	50
10,5	0,5	Schälflocken	0,6	15	39	50
10,5	1	Schälflocken	0,6	20	38	50

Für nachfolgende Experimente kann daher festgelegt werden, dass mit dem Erreichen einer konstanten Leistungsaufnahme des Elektromotors auch ein konstanter Massenstrom zu unterstellen ist. Das Erreichen des konstanten Betriebszustands kann mit dem thermischen Gleichgewicht des Systems bestimmt werden; die Feststellung erfolgt mit einer konstanten Ablauftemperatur des Expulsats. In beiden Fällen ist eine Kontrolle online während der Versuchsdurchführung möglich.

3.3.2 Die Charakteristika des stationären Betriebspunkts

Die Kontrolle des Anfahrvorgangs ist auf Grund der grossen Zeitintervalle auch mit relativ träge reagierenden Prozessgrößen, wie beispielsweise der Ablauftemperatur des Expulsats realisierbar. Die Überprüfung des Systemzustands im Betriebspunkt erfordert auf Grund der Dynamik des Systems, bestimmt durch die Rotationsgeschwindigkeit der Schneckenwelle, eine dynamisch reagierende und hinreichend genau zu erfassende Prozessgröße.

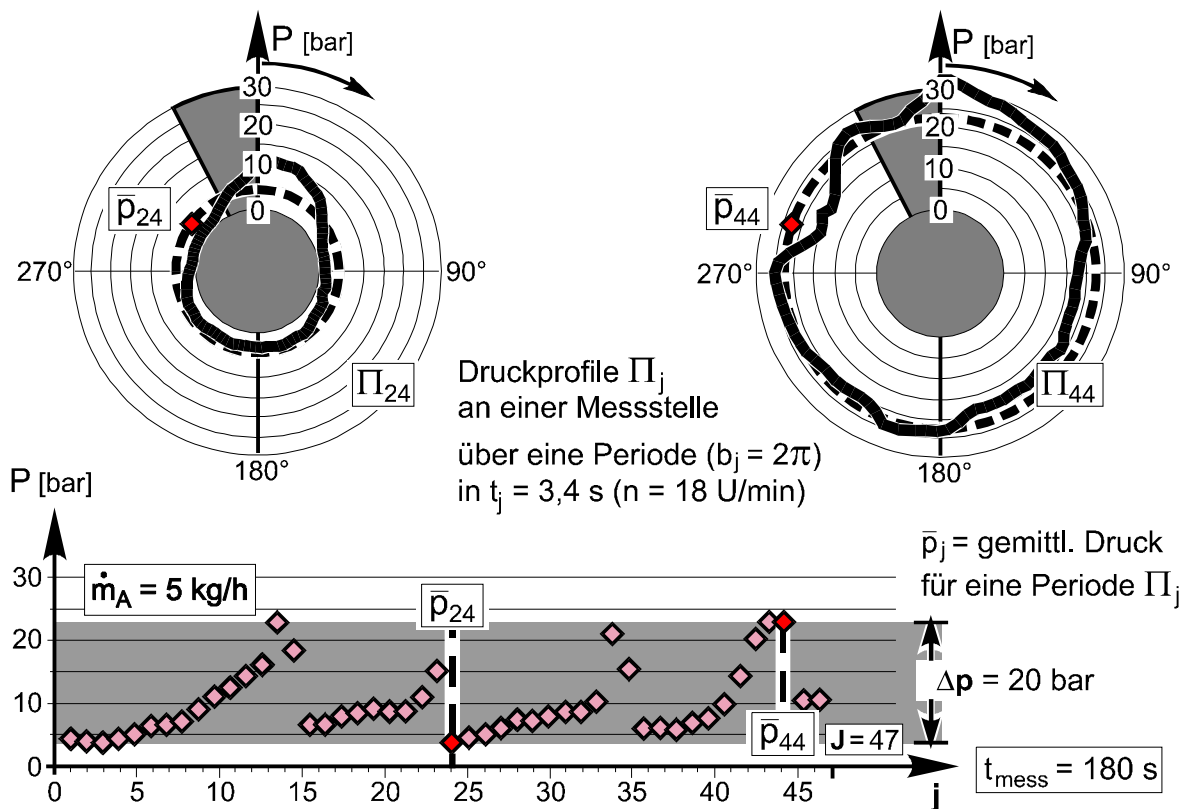


Abb. 3-26: Schnecken-Experiment im instationären Betriebszustand: Veränderung der radialen Pressdrücke (Schälrap; $xW = 7$ %)

In Abb. 3-26 ist für eine Druckmessstelle in der dritten Pressstufe (D 80-4) die Veränderung des Druckprofils über den Wellenumfang dargestellt. Von einem fast drucklosen Zustand (Π_{24}) nehmen die Drücke über den Umfang annähernd gleichmäßig zu (Π_{44}). Dabei zeigen die gemittelten Drücke über den Beobachtungszeitraum von drei Minuten ein pulsierendes Verhalten. Aufgrund der stark plastischen Materialeigenschaften und der daraus resultierenden schlechten Komprimatdrainage steigt der Druck bis auf einen kritischen Wert an und fällt anschließend wieder stark ab. In diesem Zustand kann keine Verweilzeitmessungen oder Bilanzierung durchgeführt werden.

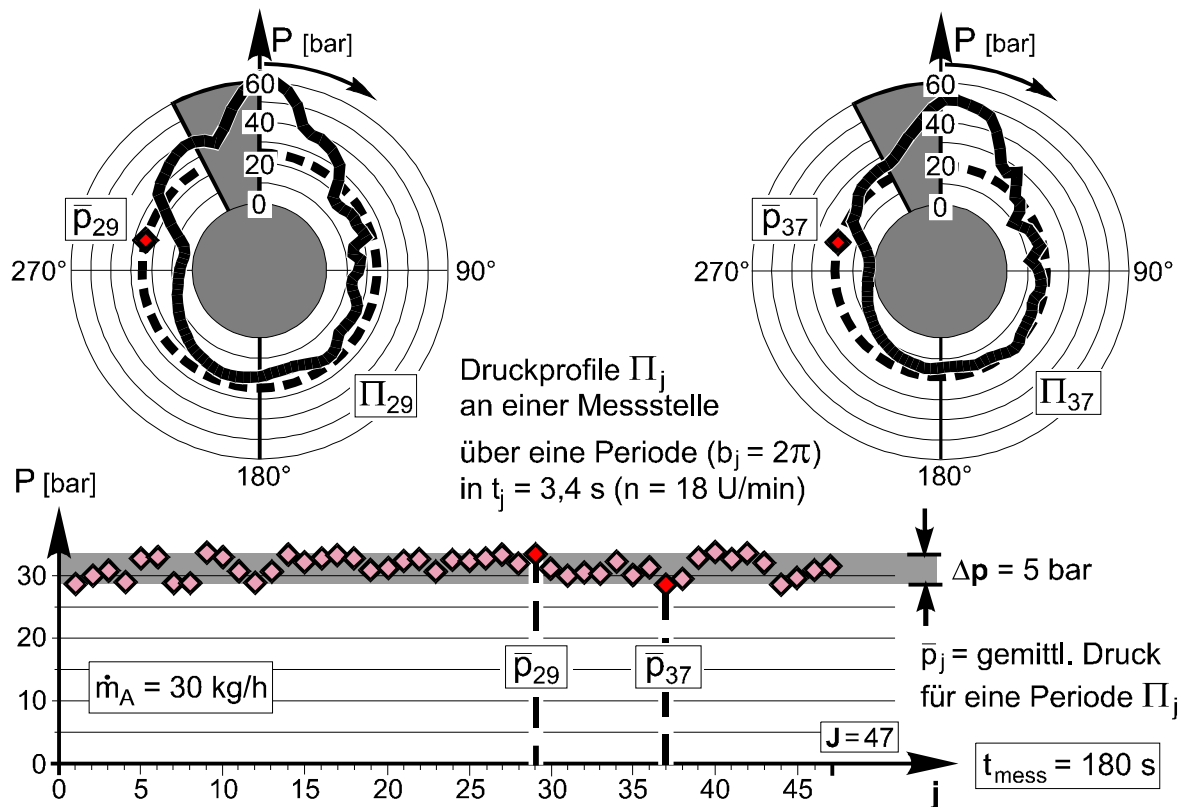


Abb. 3-27: Schnecken-Experiment im quasistationären Betriebszustand: Veränderung der radialen Pressdrücke (Schälrap; $xW = 4,5$ %)

Ein quasistationärer Betriebszustand im Schnecken-Experiment ist durch eine Kraftreaktion charakterisiert, wie sie in Abb 3-27 dargestellt ist. Die gemittelten Pressdrücke und die Druckprofile zeigen ein deutlich stabileres Verhalten über den gesamten Messzeitraum. Als weitere Folge des veränderten Systemverhaltens stellt sich ein wesentlich höherer Massendurchsatz ein. Durch den schnelleren axialen Vorschub des Materials in den sich verengenden Pressraum, ergeben sich höhere Pressdrücke und eine stärkere Rückstellkraft. Die Folge ist eine höhere Tangentialreibung am Seih, die wiederum den axialen Materialtransport fördert. Diese Wechselwirkungen münden in einem sich einstellenden Gleichgewichtszustand.

Auf Grund dieser Ergebnisse ist zu erkennen, dass der Charakter des Betriebszustands, instationär oder quasistationär, über die gemessenen radialen Pressdrücke online kontrolliert werden kann.

3.4 Zum kontinuierlichen Trennpresen in Schneckengeometrien

In den vorangegangenen Untersuchungen wurden die Einflüsse einzelner Parameter auf den kontinuierlichen Pressvorgang untersucht. Ausgehend von den in Kapitel 3.1 dargestellten Ergebnissen werden für die folgenden Untersuchungen zum kontinuierlichen Trennpresen Schneckenausrüstungen nach Abb. 3-9 eingesetzt. Variiert werden:

- die **Schneckendrehzahl** gemäß Tab. 2-4
- die **Komprimatenschaften** gemäß Tab. 3-13
- die **Kerngeometrie** gemäß Abb. 2-8

Die Untersuchungen werden in einem stationären Betriebszustand durchgeführt, wie er in Kapitel 3-3 definiert wurde.

3.4.1 Die Kraftreaktion des Komprimats

Die Veränderung der Kraftreaktion des Komprimats wird durch den radialen Pressdruck in definierten Abständen über die Länge der inneren Seihewandung gemessen. In Abb. 3-28 bis Abb. 3-33 sind für unterschiedliche Pressenkonfiguration aufeinander folgend die Pressdrücke in den einzelnen Kompressionsstufen dargestellt. Die Zahlenwerte für die abgebildeten Messwerte sind Tab. 7-9 bis Tab. 7-14 im Anhang zu entnehmen. Es ist für jede Messstelle der Wert des Minimal- und des Maximaldrucks, sowie des über eine Wellenumdrehung gewichteten Mitteldrucks aufgetragen. Die Variation der einzelnen Parameter führt zu folgenden Ergebnissen:

Die **Verlängerung des Seihers** und die damit verbundene Erhöhung der Kompressionsstufenzahl von vier auf sechs bewirkt tendenziell eine Anhebung des Druckniveaus. Die Zunahme des Drucks zeigt sich dabei in den Maximaldrücken am deutlichsten. Bei den Mittel- und Minimaldrücken fällt die Zunahme weniger deutlich aus. Im 6-stufigen Schnecken-Experiment steigen die gemessenen Drücke bis zur vierten und fünften Kompressionsstufe an und fallen in den letzten Stufen zum Auswurfende der Presskammer hin wieder ab. Es ergibt sich ein bogenförmiges Profil mit einem Maximum in der zweiten Seierhälfte. Im 4-stufigen Schnecken-Experiment steigen die Drücke generell bis zur letzten Kompressionsstufe an. Die Zunahme der Drücke von Stufe zu Stufe ist in Abhängigkeit von den Komprimatenschaften im 4-stufigen Schnecken-Experiment stärker ausgebildet als im 6-stufigen. Da Anfangs- und Endhöhe des Schneckenkanals bei beiden Experimenten konstant gehalten

wurden, ist hier der Einfluss der grösseren Stufenhöhen der 4-stufigen Geometrie zu vermuten.

Mit der **Veränderung der Kompressionslängen der Kerngeometrie** (Abb. 2-8) sind anhand der gemessenen Pressdrücke keine deutlichen Veränderungen in der Kraftreaktion des Komprimats zu erkennen. Differenzierter betrachtet zeigt sich bei Rapsbruch und der Geometrie mit $\kappa = 1$ bei allen Drehzahlen ein deutlich erhöhter Pressdruck in der fünften Stufe des 6-stufigen Experiments. Im Gegensatz dazu zeigt sich dieses Verhalten bei der Verarbeitung von Schälrap und der Geometrie mit $\kappa < 0,1$. Im 4-stufigen Experiment ist die gleiche Ausprägung nicht zu beobachten.

Eine **Veränderung der Schneckendrehzahl** führt in Abhängigkeit von den Komprimateneigenschaften und der Seiherrlänge zu unterschiedlich stark ausgeprägten Effekten. Tendenziell ist mit der Erhöhung der Drehzahl eine Abnahme der Pressdrücke zu verzeichnen. Dieser Effekt zeigt sich im 6-stufigen Schnecken-Experiment deutlicher als im 4-stufigen Experiment. Bei der Verarbeitung von Rapsbruch ist der Druckabfall mit steigender Drehzahl klar zu erkennen (Abb. 3-29). Bei Schälrap stellen sich die Veränderungen weniger deutlich dar, sind aber immer noch zu erkennen. Bei der Verarbeitung von Schälfflocken sind kaum noch Unterschiede vorhanden.

Die **Komprimateneigenschaften** haben den grössten Einfluss auf die gemessenen Pressdrücke. Das höchste Druckniveau ist bei der Verarbeitung von Rapsbruch zu verzeichnen. Die harten und elastischen Rapshüllen sind hier als Verursacher von Pressdrücken bis zu 150 bar anzusehen. Obwohl der hüllenreduzierte Schälrap einen annähernd gleichen Aufschlussgrad wie der Rapsbruch aufweist, fällt die Kraftreaktion deutlich geringer aus. Die Verminderung der Kraftreaktion bei der Verarbeitung von Schälfflocken ist auf den hohen Aufschlussgrad zurückzuführen. Die Unterschiede zwischen der Verarbeitung von Schälrap und Schälfflocken fallen weniger deutlich aus als bei der Verarbeitung von Rapsbruch.

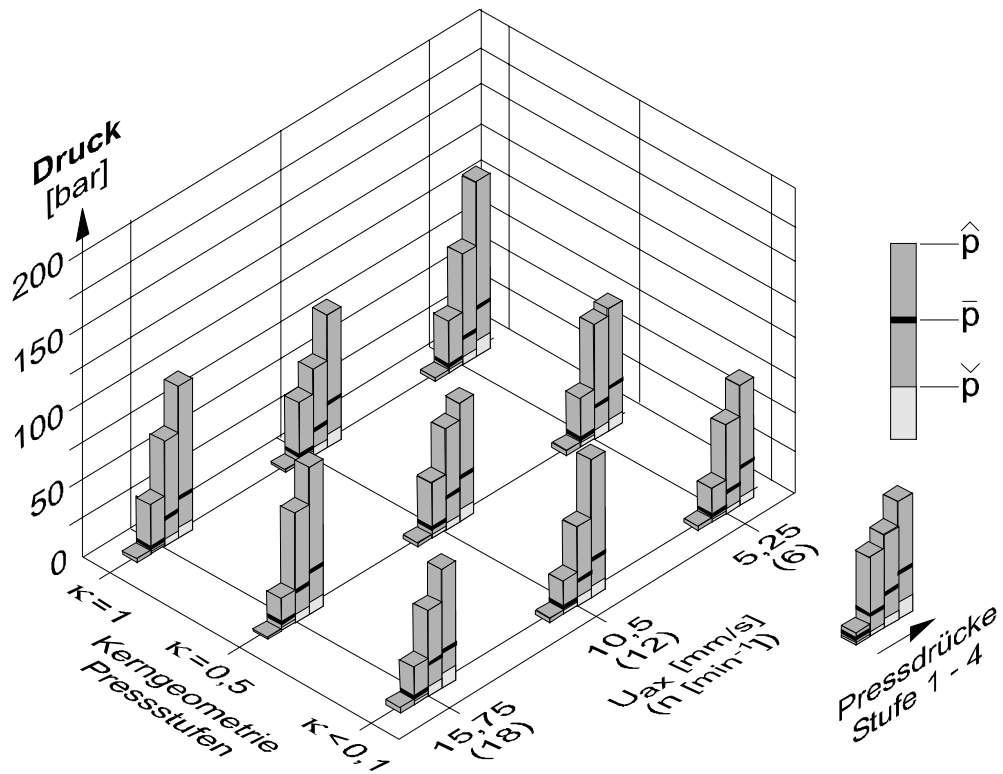


Abb. 3-28: Kraftreaktion von Rapsbruch, 4-stufiges Schnecken-Experiment
Variation von Kerngeometrie und Drehzahl (vgl. Tab. 7-9)

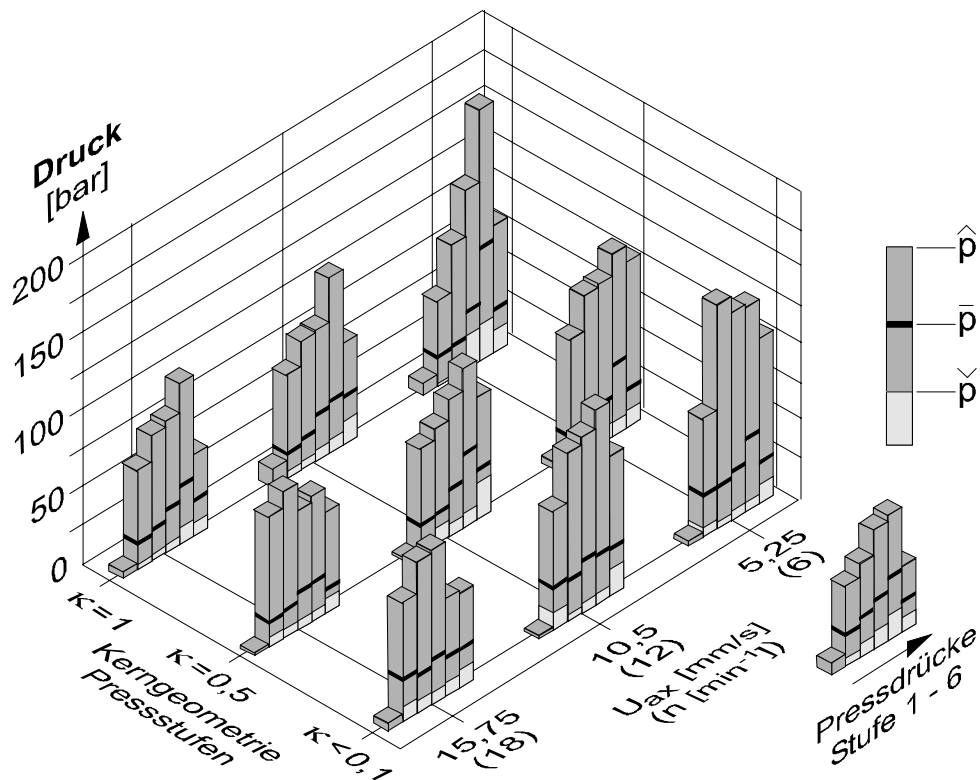


Abb. 3-29: Kraftreaktion von Rapsbruch, 6-stufiges Schnecken-Experiment
Variation von Kerngeometrie und Drehzahl (vgl. Tab. 7-10)

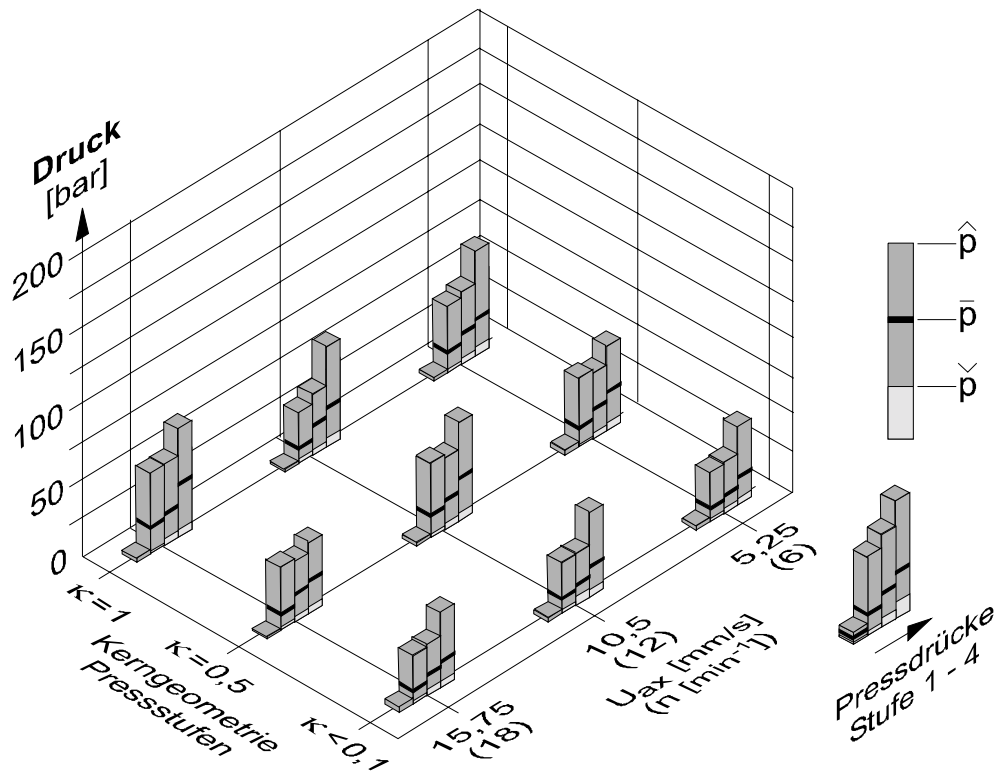


Abb. 3-30: Kraftreaktion von Schälrap, 4-stufiges Schnecken-Experiment
Variation von Kerngeometrie und Drehzahl (vgl. Tab. 7-11)

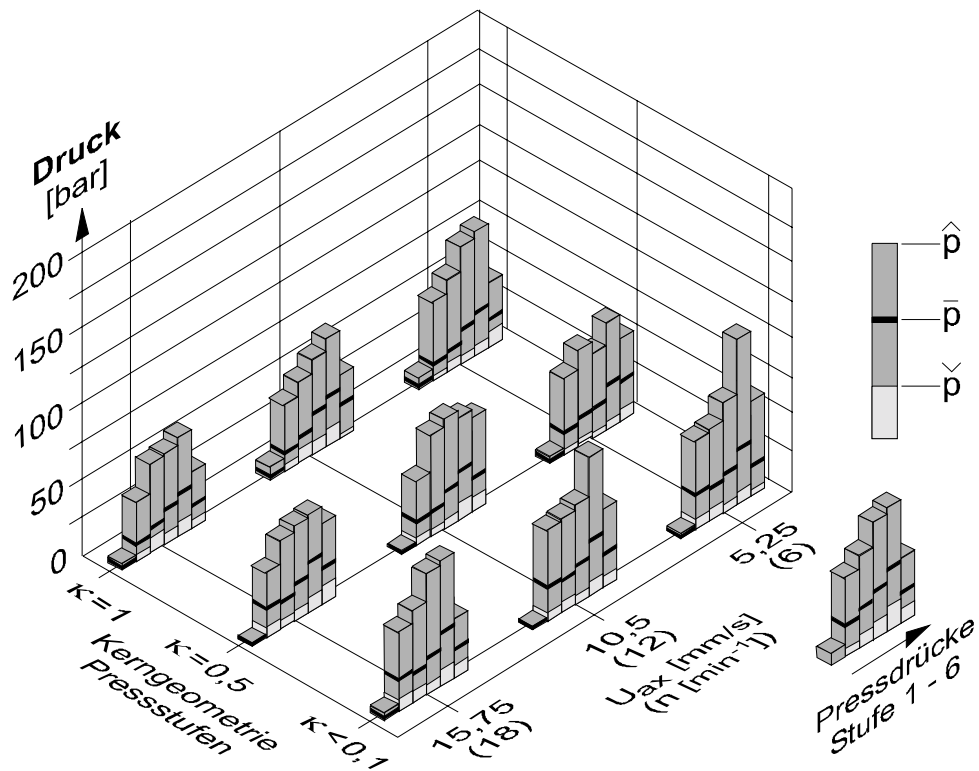


Abb. 3-31: Kraftreaktion von Schälrap, 6-stufiges Schnecken-Experiment;
Variation von Kerngeometrie und Drehzahl (vgl. Tab. 7-12)

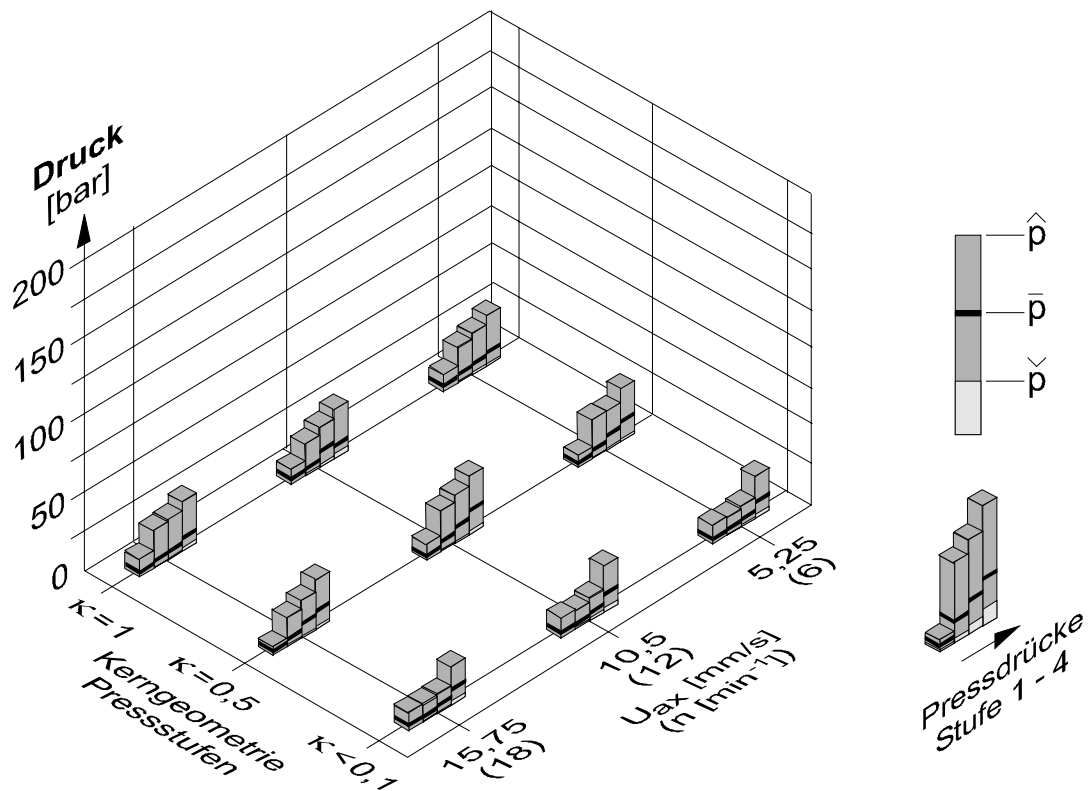


Abb. 3-32: Kraftreaktion von Schälflöcken, 4-stuf. Schnecken-Experiment, Variation von Kerngeometrie und Drehzahl (vgl. Tab. 7-13)

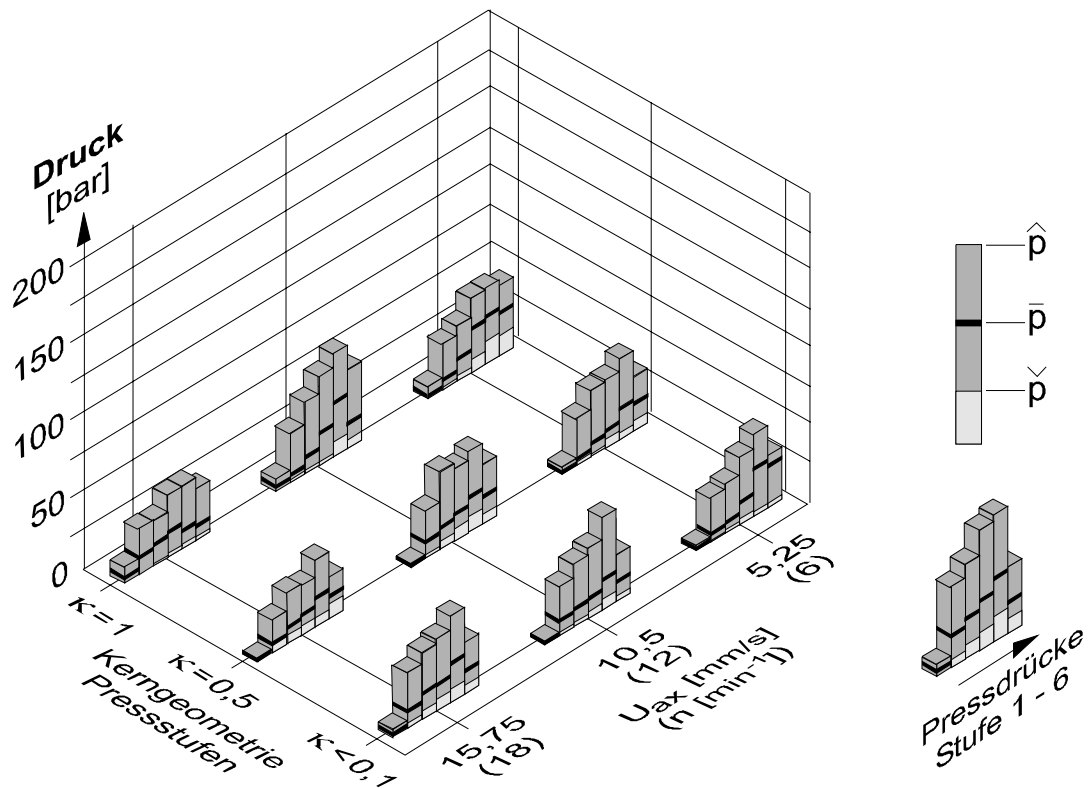


Abb. 3-33: Kraftreaktion von Schälflöcken, 6-stuf. Schnecken-Experiment, Variation von Kerngeometrie und Drehzahl (vgl. Tab. 7-14)

3.4.2 Die Komprimatbewegung

Die Veränderung der Komprimatbewegung wird über die axiale Vorschubgeschwindigkeit des Materials beschrieben; die Bestimmung erfolgt über die abschnittsweise Verweilzeitmessung. Die Ergebnisse der Verweilzeitmessung im 4-stufigen und 6-stufigen Schnecken-Experiment sind in den Abb. 3-34 bis 3-39 exemplarisch dargestellt, um eine Aussage über die Veränderung der axialen Komprimatbewegung unter der Variation von Seiherlänge, Schnecken-geometrie, Schneckendrehzahl und den Komprimateneigenschaften machen zu können. Über die Komprimatrotation und der im Arbeitsmodell postulierten helixförmigen Bewegung des Komprimats in der Presskammer kann zunächst keine Aussage gemacht werden. Die Variation der einzelnen Parameter führt zu folgenden Ergebnissen:

Bei der **Verlängerung des Seiher**s ist im Vergleich zwischen dem 4-stufigen und dem 6-stufigen Schnecken-Experiment festzustellen, dass die axiale Geschwindigkeit des Komprimats in der verlängerten Presskammer generell höher ausfällt. Besonders deutlich zeigt sich dieses Verhalten in den Abb. 3-34 und Abb. 3-35. Die Unterschiede im axialen Materialtransport nehmen bei höheren Drehzahlen zu. Bei der Variation der Schnecken-geometrie (Abb. 3-36 und Abb. 3-37) und der Komprimateneigenschaften (Abb. 3-38 und Abb. 3-39) zeigt sich im Vergleich zwischen den Seihervarianten die gleiche Tendenz, jedoch nicht so deutlich wie bei der Drehzahländerung. Ein weiterer Unterschied zwischen den 4-stufigen und den 6-stufigen Experimenten zeigt sich im qualitativen Verlauf der axialen Geschwindigkeiten. Während in der langen Seiher-Variante ein generell bogenförmiger Verlauf mit einem Maximum in der zweiten Seiherhälfte festzustellen ist, sind die Geschwindigkeitsverläufe im 4-stufigen Schnecken-Experiment ausschließlich durch einen stetig ansteigenden Kurvenverlauf charakterisiert.

Die **Veränderung der Schneckendrehzahl** bewirkt erwartungsgemäß die deutlichsten Veränderungen in der axialen Vorschubgeschwindigkeit des Materials. Mit steigender Drehfrequenz der Schneckenwelle ist eine deutliche Zunahme des axialen Materialtransports zu erkennen. Dabei fallen die Veränderungen im 4-stufigen Experiment geringer aus als im 6-stufigen. Die axialen Vorschubgeschwindigkeiten sind in den 4-stufigen Experimenten durch einen monoton steigenden Verlauf über die Seiherlänge charakterisiert; in den 6-stufigen Experimenten zeigt sich ein bogenförmiger Verlauf.

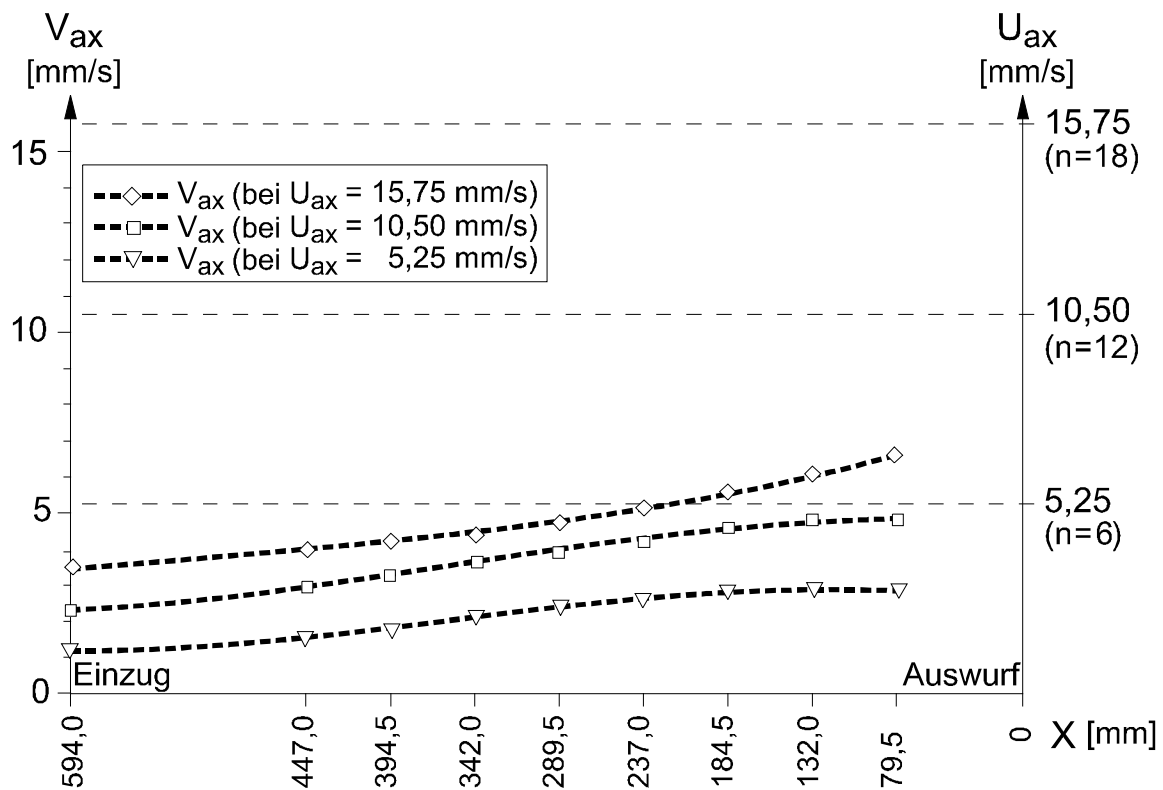


Abb. 3-34: Axiale Vorschubgeschwindigkeit von Schälfflocken im 4-stufigen Schnecken-Experiment unter Variation der Drehzahl

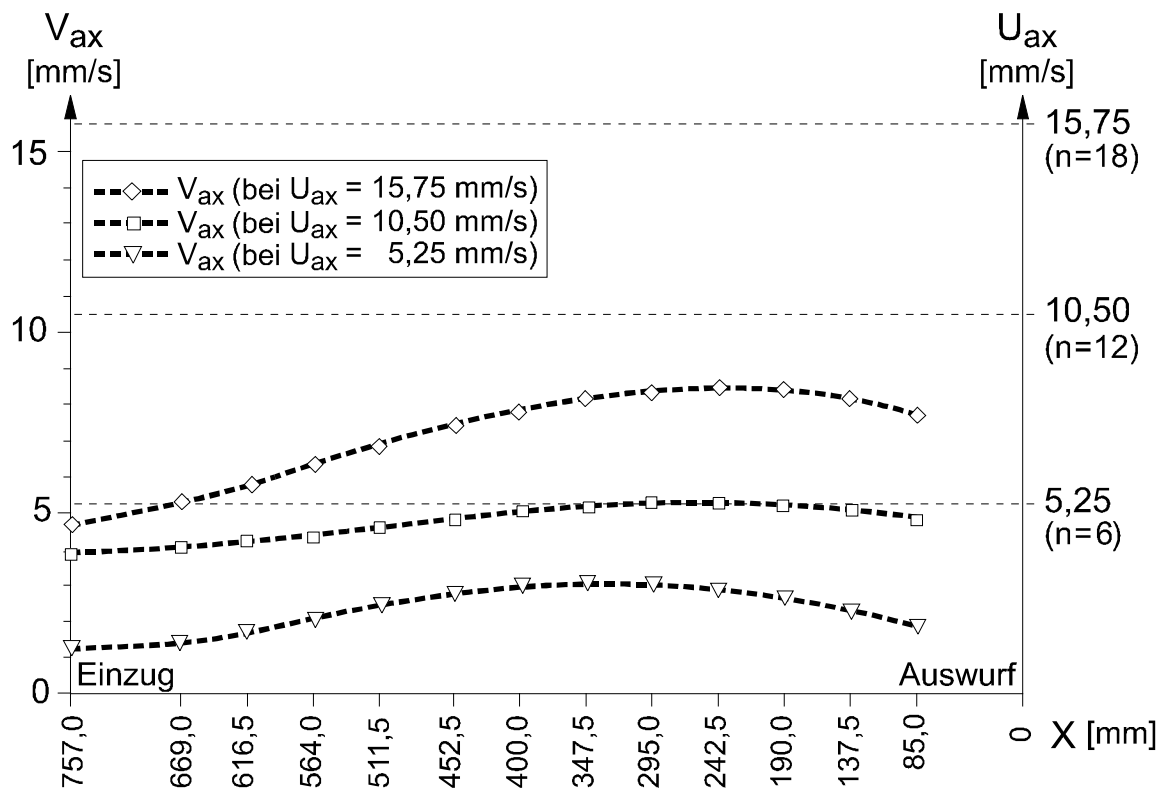


Abb. 3-35: Axiale Vorschubgeschwindigkeit von Schälfflocken im 6-stufigen Schnecken-Experiment unter Variation der Drehzahl

Mit der **Veränderung der Kerngeometrie** zeigen sich folgende Ergebnisse:

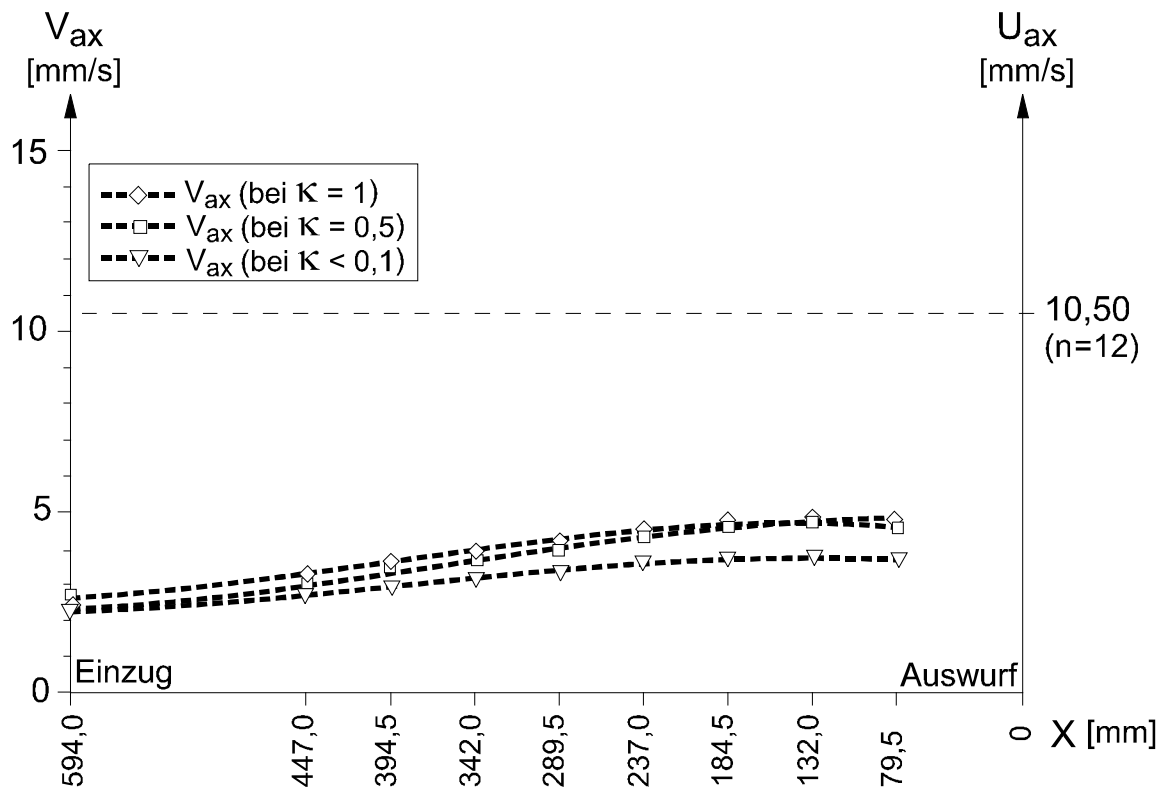


Abb. 3-36: Axiale Vorschubgeschwindigkeit von Schälflöcken im 4-stufigen Schnecken-Experiment unter Variation der Kerngeometrie

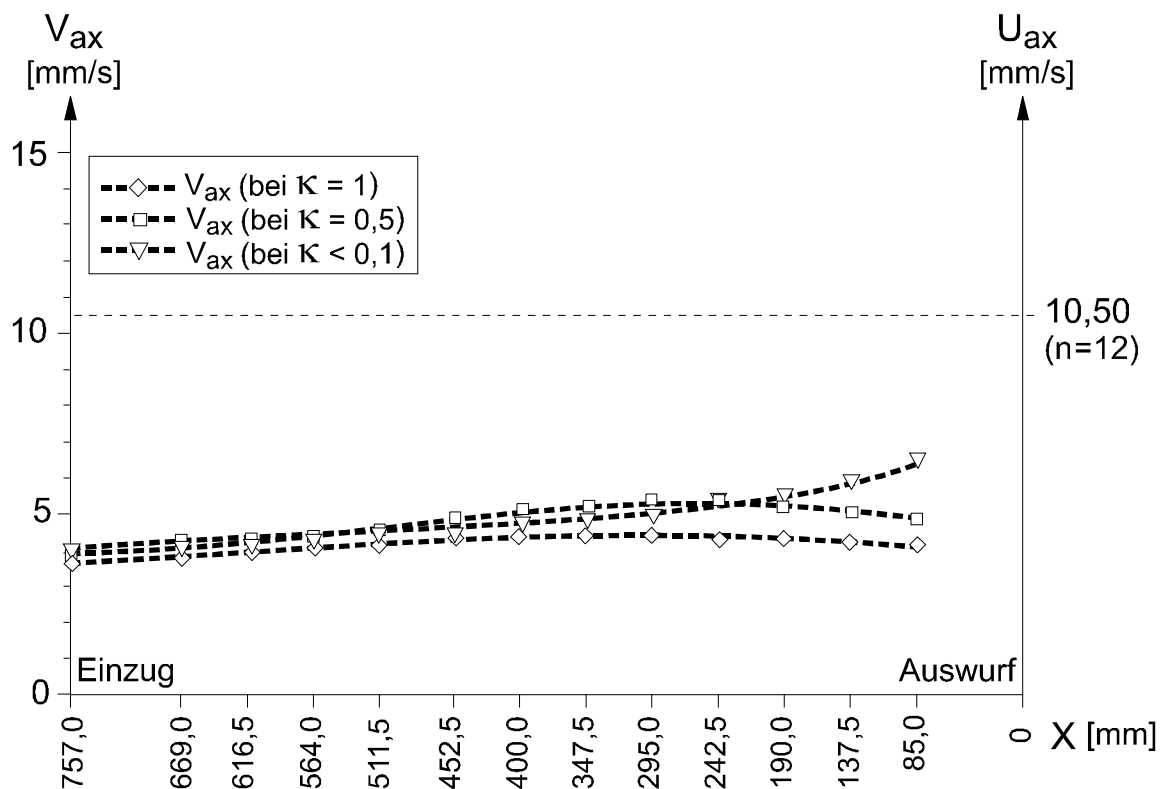


Abb. 3-37: Axiale Vorschubgeschwindigkeit von Schälflöcken im 6-stufigen Schnecken-Experiment unter Variation der Kerngeometrie

Die Variation der Kerengeometrie (Abb. 3-36 und Abb. 3-37) führt, bis auf die bereits erwähnten Unterschiede zwischen den Seihervarianten, zu keinen deutlichen Abweichungen in der axialen Vorschubgeschwindigkeit. Das ermittelte Spektrum des axialen Materialtransports liegt im 4-stufigen und 6-stufigen Schnecken-Experiment eng zusammen. Bezüglich des Einflusses unterschiedlicher Kerengeometrien auf den Pressvorgang unterstreichen die gemessenen Materialbewegungen damit die Ergebnisse aus der Radialdruckmessung.

Die **Variation der Komprimateneigenschaften** scheint ebenfalls keinen entscheidenden Einfluss auf die axiale Materialbewegung zu haben (Abb. 3-38 und Abb. 3-39). Während im 4-stufigen Experiment die ermittelten Graphen der axialen Geschwindigkeiten nahe zusammenliegen, sind im 6-stufigen Experiment leichte Unterschiede zu erkennen. Dabei ist die axiale Vorschubgeschwindigkeit bei Schälraps am höchsten. Die Werte für Rapsbruch und Schälflocken liegen geringfügig tiefer.

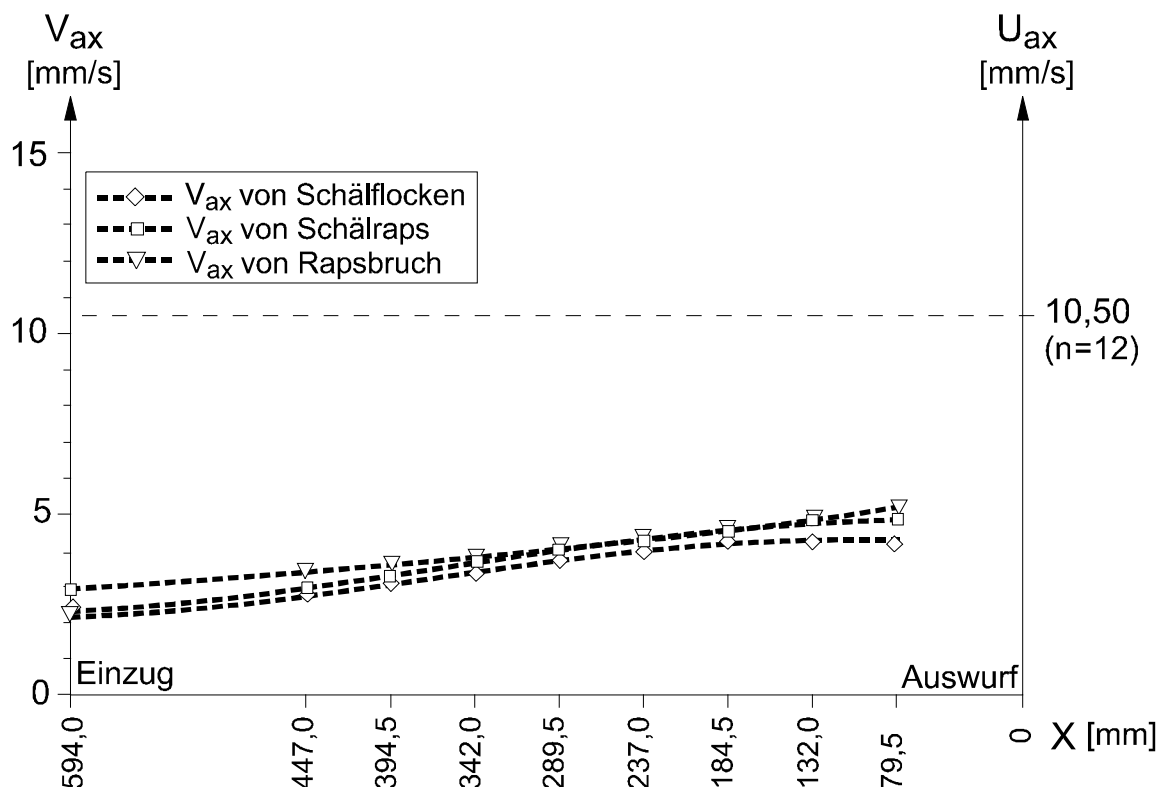


Abb. 3-38: Axiale Vorschubgeschwindigkeit des Komprimats im 4-stufigen Schnecken-Experiment unter Variation der Komprimateneigenschaften

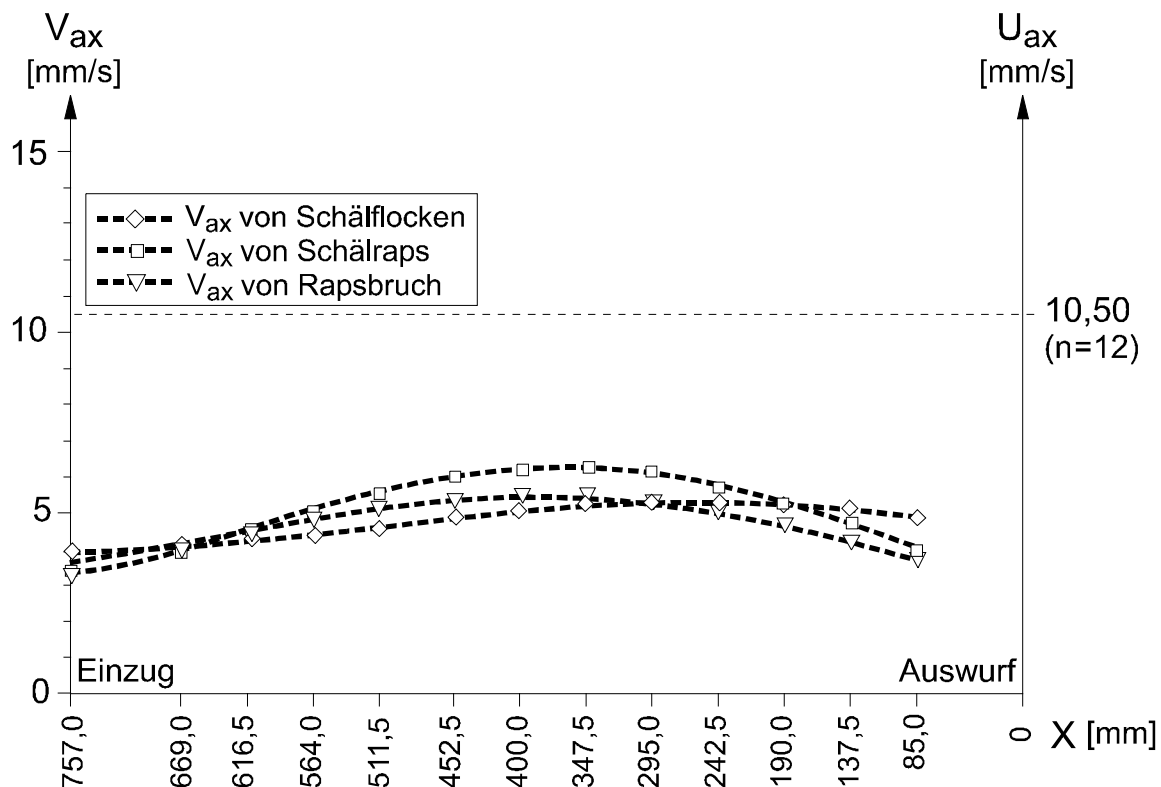


Abb. 3-39: Axiale Vorschubgeschwindigkeit des Komprimats im 6-stufigen Schnecken-Experiment unter Variation der Komprimateneigenschaften

3.4.3 Die Massenbilanzierung

Die Ergebnisse zur Bilanzierung der über die Systemgrenzen ein- und austretenden Massen sind in Abb. 3-40 und Abb. 3-41 für das 4-stufige und das 6-stufige Schnecken-Experiment abgebildet. Die Zahlenwerte für die dargestellten Messungen und die resultierenden Restölbeladungen im Pressschilfer sind Tab. 7-15 und Tab. 7-16 im Anhang zu entnehmen. Die in den Versuchen variierten Parameter haben folgende Auswirkungen auf das Pressergebnis:

- **Seiherrlänge**

Bei der **Verlängerung des Seihers** ist im 6-stufigen Schnecken-Experiment im Vergleich zum 4-stufigen Schnecken-Experiment eine deutliche Erhöhung des Massendurchsatzes um z. T. mehr als 20 % festzustellen. Diese Durchsatzerhöhung zeigt sich in der ausgeworfenen Schilfermenge und bei der Menge an abgepresstem Expulsat. Mit der Seiherverlängerung ist ebenfalls eine Reduzierung der Restölbeladung im Pressschilfer verbunden.

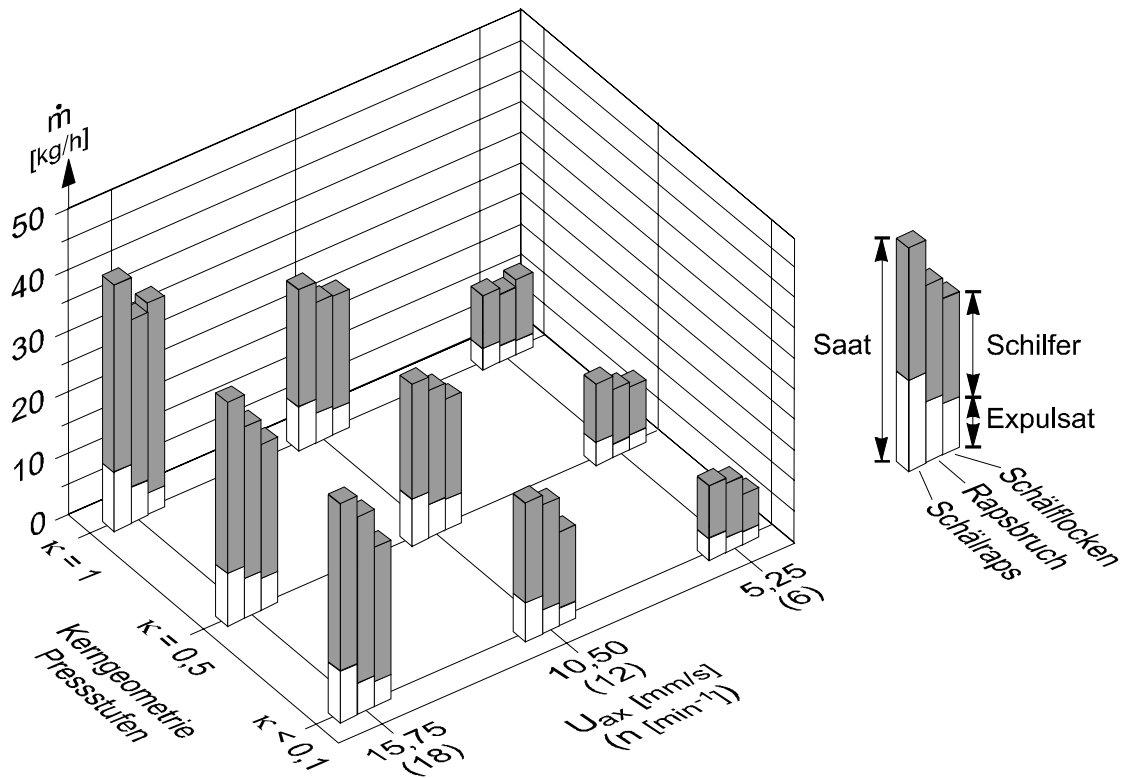


Abb. 3-40: Schnecken-Experiment D 80-4: Massenbilanz unter Variation von Kerngeometrie, Drehzahl und Komprimat (vgl. Tab. 7-15)

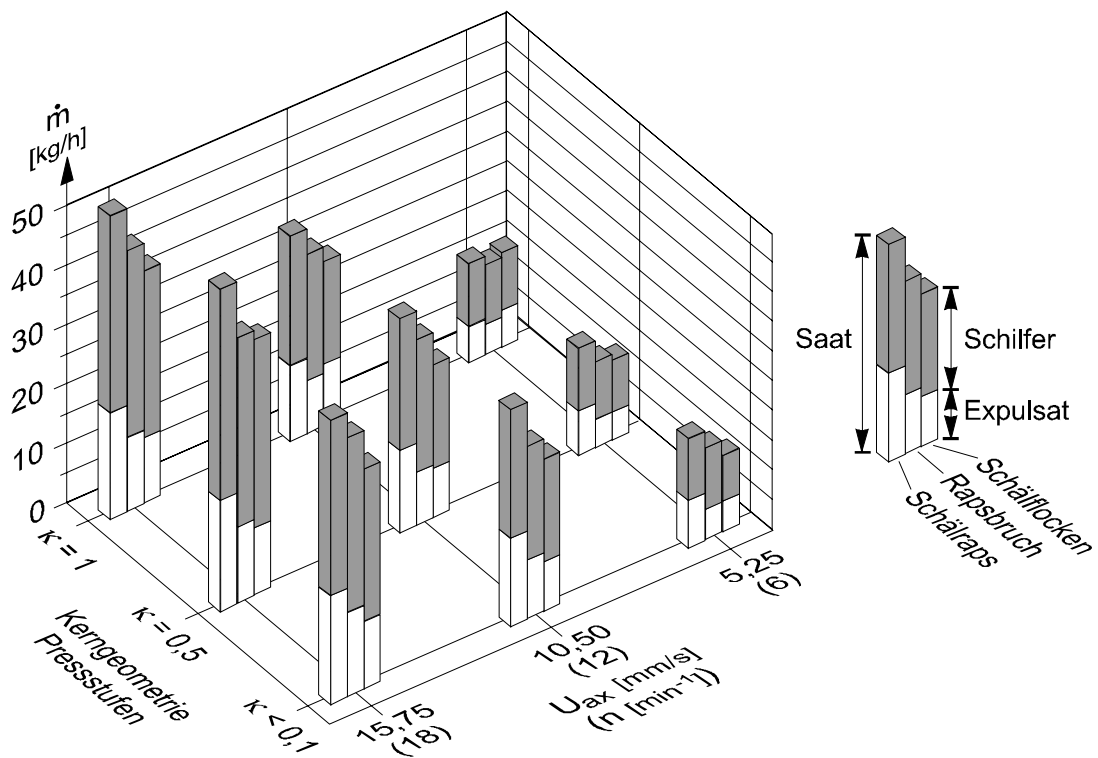


Abb. 3-41: Schnecken-Experiment D 80-6: Massenbilanz unter Variation von Kerngeometrie, Drehzahl und Komprimat (vgl. Tab. 7-16)

Mit einer **Veränderung der Kerngeometrie** sind in beiden Seihervarianten keine deutlichen Unterschiede im Massendurchsatz zu erkennen. Bei der Verarbeitung von Schälfflocken ist mit Zunahme der Konussteigung (Verkürzung von L_K) ein geringfügig kleinerer Massendurchsatz zu verzeichnen. Bei der Verarbeitung von Rapsbruch und Schälrapraps ist jedoch keine eindeutige Tendenz zu erkennen.

Die Restölbeladung im Pressschilfer wird weder im 4-stufigen noch im 6-stufigen Experiment durch eine Veränderung der Kerngeometrie deutlich beeinflusst. Insgesamt hat eine Veränderung der Kerngeometrie gemäß Abb. 2-8 keinen entscheidenden Einfluß auf die Massenbilanzierung

Die **Variation der Schneckendrehzahl** führt bei der Massenbilanzierung im 4-stufigen und im 6-stufigen Schnecken-Experiment zu sehr deutlichen Unterschieden. Mit einer Erhöhung der Drehzahl ist eine deutliche Zunahme des Massendurchsatzes zu verzeichnen.

Eine Erhöhung der Schneckendrehzahl führt in beiden Experimenten zu einer deutlich höheren Restölbeladung, d.h. der Abpressgrad verschlechtert sich mit zunehmender Drehzahl. Der Effekt zeigt sich im 4-stufigen Experiment deutlicher als im 6-stufigen Experiment. Das Pressergebnis wird mit steigender Drehzahl durch zwei konkurrierende Ergebnisparameter, steigender Massendurchsatz und niedrigerer Abpressgrad, beeinflusst.

Die **Komprimateneigenschaften** beeinflussen den Massendurchsatz deutlich. Dieser Einfluss ist aber eng an die Parameter Wellendrehzahl und Seihierlänge gekoppelt. Generell ist der Massendurchsatz bei der Verarbeitung von Schälrapraps am höchsten. Der Durchsatz bei der Verarbeitung von Rapsbruch liegt z. T. deutlich darunter. Das 4-stufige und das 6-stufige Schnecken-Experiment sind bei der Verarbeitung von Schälfflocken durch den niedrigsten Massendurchsatz charakterisiert.

Die Unterschiede in den Massendurchsätzen nehmen jedoch mit steigender Drehzahl zu und zeigen sich bei $n = 18 \text{ min}^{-1}$ am deutlichsten. Eine verstärkende Wirkung auf den Einfluss der Komprimateneigenschaften ist auch bei einer Verlängerung des Seihers zu beobachten. Im 6-stufigen Schnecken-Experiment zeigen sich die Unterschiede zwischen den Massendurchsätzen bei unterschiedlichen Materialeigenschaften deutlicher als im 4-stufigen Schnecken-Experiment.

Die Restölbeladung im Pressschilfer wird durch die Komprimat-eigenschaften ebenfalls deutlich beeinflusst. Die Ergebnisse sind aber wie bei dem Massendurchsatz eng mit den Einflüssen der Schneckendrehzahl und der Seiherrlänge gekoppelt. Die Verlängerung des Seihers und die Drehzahlerhöhung wirken sich dabei verstärkend auf den Einfluss der Komprimat-eigenschaften und auf das Pressergebnis aus. Der Pressschilfer der Schällocken ist dabei durch die höchste Restölbeladung, der Pressschilfer von Schälrapr ist dagegen durch die geringsten Restölbeladungen gekennzeichnet.

3.4.4 Die Energiebilanzierung

Die Ergebnisse zur Bilanzierung der Energieumsätze innerhalb der Systemgrenzen sind in Abb. 3-42 und Abb. 3-43 für das 4-stufige und 6-stufige Schnecken-Experiment abgebildet. Variiert wurden die Seiherrlänge, die Kerngeometrie, die Schneckendrehzahl und die Komprimat-eigenschaften. Die Zahlenwerte für die dargestellten Messungen und die spezifische mechanische Energieeinleitung SME sind Tab. 7-17 und Tab. 7-18 im Anhang zu entnehmen. Die in den Versuchen variierten Parameter haben folgende Auswirkungen auf das Pressergebnis:

Mit der **Verlängerung des Seihers** ist eine deutliche Erhöhung der spezifischen mechanischen Energieeinleitung (SME) um z. T. über 30 % zu erkennen. Dabei verstärkt die längere Seihervariante die Einflüsse der übrigen Parameter auf den Pressvorgang; im Vergleich zum 4-stufigen Schnecken-Experiment ist im 6-stufigen Experiment eine z. T. deutliche Erhöhung der maximalen Ablauftemperatur des Expulsats festzustellen.

Mit der **Veränderung der Kerngeometrie** ist bei der Verarbeitung von Schälrapr und Schällocken keine eindeutige Veränderung der SME zu verzeichnen. Bei der Verarbeitung von Raprbruch führt eine Zunahme der Konussteigung (Verkürzung der L_K) zu einer leicht geringeren Energieeinleitung.

Auf die Ablauftemperatur des Expulsats hat eine Veränderung der Kerngeometrie ebenfalls keinen entscheidenden Einfluss. Eine Zunahme der Konussteigung (Verkürzung der L_K) führt tendenziell zu niedrigeren Ablauftemperaturen, die Unterschiede fallen jedoch sehr gering aus.

Die **Veränderung der Schneckendrehzahl** beeinflusst die mechanische Energieeinleitung wie den Massendurchsatz wesentlich. Im 4-stufigen und im 6-stufigen Experiment sind eine deutliche Erhöhung der SME und eine Erhöhung der zu leistenden Pressarbeit mit sinkender Drehzahl zu verzeichnen. Der Effekt zeigt sich in der längeren Seihervariante deutlicher.

Auf die Expulsatablauftemperatur hat die Veränderung der Schneckendrehzahl jedoch kaum Einfluss; eine eindeutige Tendenz ist nicht zu erkennen.

Der **Einfluss der Komprimateneigenschaften** auf die mechanische Energieeinleitung hängt z. T. stark von der Schneckendrehzahl und der Seihelänge ab. Im 4-stufigen Schnecken-Experiment liegt die mechanische Energieeinleitung bei Rapsbruch z. T. unterhalb der SME für Schälrapr und Schälflocken, während bei der langsamen Drehzahl und im 6-stufigen Schnecken-Experiment die SME bei Rapsbruch generell über den Werten bei der Verarbeitung von Schälrapr und Schälflocken liegt. Dabei ist wieder eine Verstärkung des Einflusses bei der längeren Seihervariante zu beobachten.

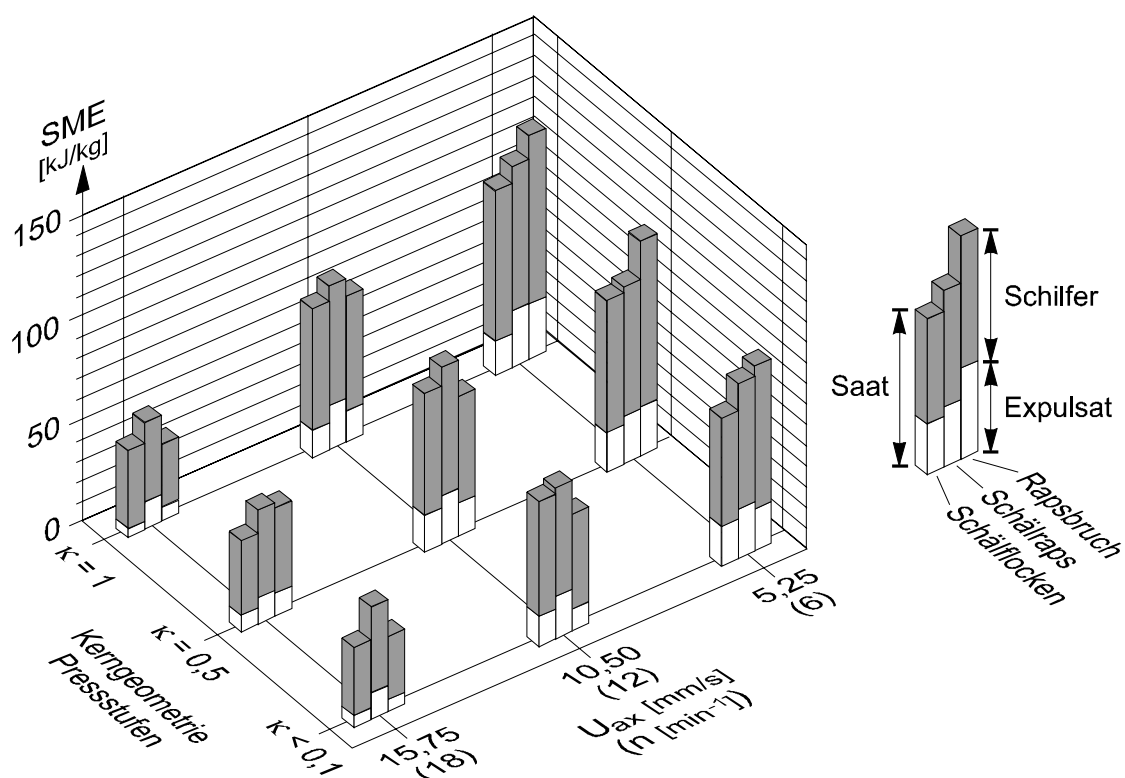


Abb. 3-42: Schnecken-Experiment D 80-4: Energiebilanz unter Variation von Kerngeometrie, Drehzahl und Komprimat (vgl. Tab. 7-17)

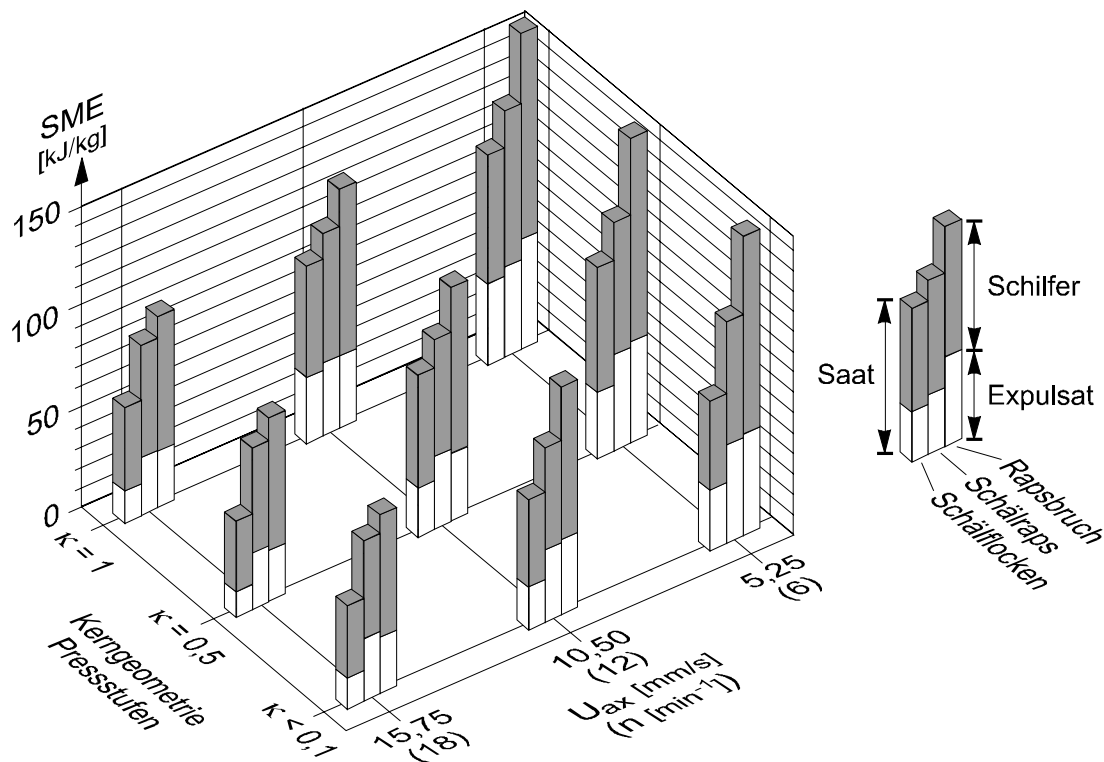
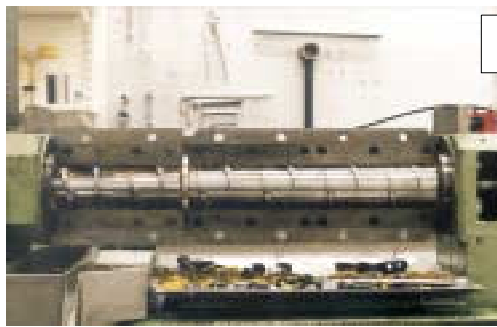


Abb. 3-43: Schnecken-Experiment D 80-6: Energiebilanz unter Variation von Kerngeometrie, Drehzahl und Komprimat (vgl. Tab. 7-18)

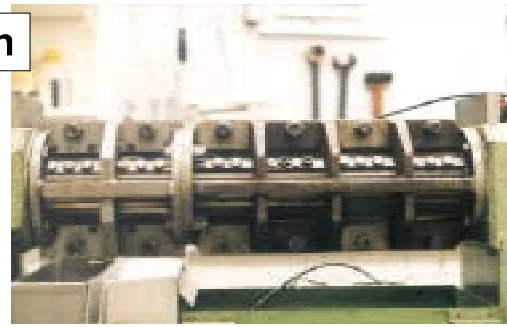
Die Komprimateneigenschaften beeinflussen die maximalen Ablauftemperaturen des Expulsats deutlich. Die Werte für die Ablauftemperaturen sind der Tab. 7-17 und der Tab. 7-18 im Anhang zu entnehmen. Entsprechend zur SME liegt die Expulsattemperatur bei der Verarbeitung von Rapsbruch mit hoher und mittlerer Drehzahl im 4-stufigen Schnecken-Experiment z. T. unterhalb der Ablauftemperaturen des Expulsats von Schälrap und Schälflöcken. Im 6-stufigen Experiment liegt die Temperatur des ablaufenden Expulsats von Rapsbruch dagegen z. T. deutlich über den Werten von Schälrap. Die Komprimateneigenschaften haben hingegen einen deutlichen Einfluss auf die Temperatur. Insbesondere im 6-stufigen Experiment zeigt sich der Zusammenhang zwischen SME und Expulsatablauftemperatur.

Ein optischer Nachweis der Energieumsätze wird ergänzend durch den Einsatz eines Thermographie-Systems geführt werden. In Abb. 3-44 sind die Thermographien der Oberflächentemperaturen von Seiher und Schnecke bei der Verarbeitung von Schälflöcken und Rapsbruch dargestellt. Der Unterschied in den Temperaturfeldern ist deutlich zu erkennen. Bei der Verarbeitung von Rapsbruch sind sowohl an der Seiheroberfläche, wie auch an der Schneckenoberfläche im Gegensatz zu den Schälflöcken deutlich höhere Temperaturen zu verzeichnen.



Schnecke / Seiher, innen

Ansichten



Seiher, außen

Temperaturen der Oberflächen

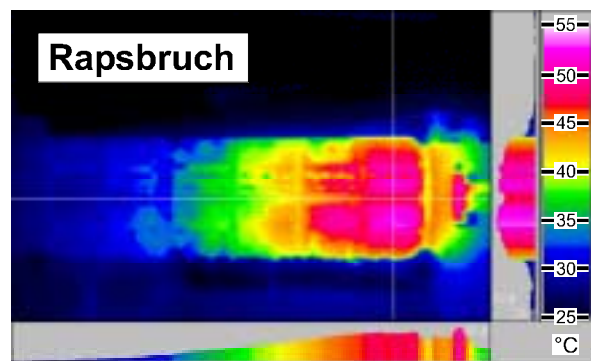
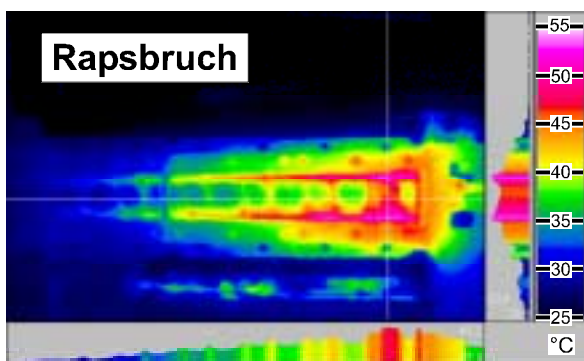
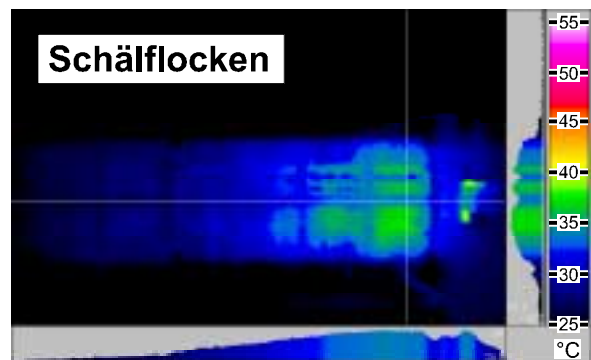
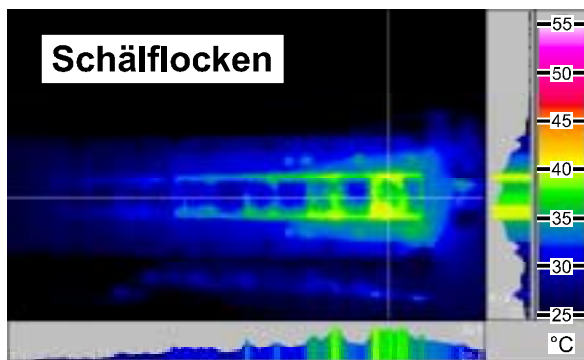


Abb. 3-44: Thermographie der Oberflächentemperaturen von Seiher und Schnecke bei der Verarbeitung von Schälflöcken und Rapsbruch

Die gemessenen Werte zeigen, dass bei einem geringeren Aufschlussgrad die von der Presse zu leistende Arbeit und als Folge die Umsetzung von mechanischer in thermische Energie deutlich höher ist als bei einem hohen Aufschlussgrad. Zusätzlich bewirkt ein überwiegend elastisches Material, gekoppelt mit einer hohen Rückstellkraft eine stärkere Tangentialreibung am Seiher als ein Material mit einem überwiegend plastischen Verhalten. Im Vergleich zu den mit Thermoelementen gemessenen Werten ist eine gute Reproduzierbarkeit zwischen den beiden Meßverfahren zu erkennen.

4 Diskussion

Im Arbeitsmodell wurde postuliert, dass die "äußeren Größen" Geometrie und Drehzahl eine Reaktion des Komprimats als "innere Größe" hervorruft. Im Folgenden soll das aufgestellte Arbeitsmodell in Bezug auf die erzielten Ergebnisse überprüft werden. Die enge Wechselwirkung zwischen den einzelnen Parametern erschwert aber eine abgegrenzte Betrachtung einzelner Einflussgrößen in der Ergebnisdiskussion.

Anhand der in den Schnecken-Experimenten gewonnenen Erkenntnisse, soll zum Abschluß das Transformationsmodell zwischen Schnecken- und Linearpresse kritisch betrachtet werden.

4.1 Die "äußeren Größen" Geometrie und Drehzahl

Als "äußere Größen" sind die Drehzahl der Schneckenwelle und die geometrischen Bedingungen in der Presskammer anzusehen. Bei den geometrischen Größen ist weiterhin zwischen der Helixgeometrie, der Kerngeometrie und der Seiherkonfiguration zu unterscheiden.

4.1.1 Die Helixgeometrie

Stand der Technik bei der Konstruktion technischer Seiher-Schneckenpressen zur Ölsaatenverarbeitung ist eine Helixgeometrie mit unterbrochenem Schneckensteg und degressiver Gangsteigung [41, 12, 72]. Zugunsten eines gleichmäßigen Materialtransports wurde im Arbeitsmodell eine Helixgeometrie mit geschlossenem Schneckensteg und konstanter Gangsteigung präferiert.

Aus den erzielten Ergebnissen ist zu erkennen, dass eine Schneckengeometrie mit geschlossenem Schneckensteg auch in Kombination mit

- veränderten Reibungsbedingungen am Seiher,
- statischen Abstreifern am Eingang zur Seiherkammer,
- einer Drosselung des Materialstroms am Ausgang der Seiherkammer
- und unter Variation von Drehzahl und Materialeigenschaften

keine hinreichenden Kraftreaktionen des Komprimats zur Einleitung eines Expulsatabflusses über die Länge der Seiherkammer initiiert.

Eine Unterbrechung des Schneckenstegs sowohl in den Bereichen der konischen Schneckenelemente als auch in den Bereichen der zylindrischen Schneckenelemente führt aber zu einem deutlichen Anstieg der Kraftreaktion des Komprimats schon zu Beginn der Seiherkammer. Die Folge ist ein früher Expulsatabfluss aus der Seiherkammer heraus. Dabei zeichnet sich die Kombination von zylindrischem Förderelement und konischem Kompressions-element gegenüber der umgekehrten Variante als effektiver aus.

Die Funktionalität der technischen Schneckengeometrien findet bezüglich des unterbrochenen Schneckenstegs in den erzielten Ergebnissen eine Begründung; eine Erklärung oder Herleitung für diese konstruktive Auslegung wird in der zugänglichen Literatur nicht gegeben. Auf Grund dieser Feststellung ist eine Korrektur des aufgestellten Arbeitsmodells erforderlich und die Funktionalität der Schneckenhelix neu zu bewerten:

Zur Verdichtung einer losen Schüttung aus Einzelpartikeln ist die Konsolidierung dieser Einzelpartikel erforderlich. Erst im verdichteten Zustand kann das Material Spannungen aufnehmen, die ab einem kritischen Wert den Abpressvorgang einleiten. Diese Konsolidierung scheint durch den geschlossenen Schneckensteg verhindert zu werden; das Material wird über den gesamten Pressweg zwangsgefördert und ständig umgeschichtet.

Durch Unterbrechungen des Schneckenstegs entstehen Zonen, in denen diese direkte Zwangsförderung unterbrochen und die Einzelpartikel nur durch nachfolgende Partikel weitergeschoben werden. Dieser Effekt des Nachschiebens kann nun die zur Verdichtung erforderliche Konsolidierung einleiten. In der nachfolgenden Zone mit Schneckensteg scheint das entstandene Materialgefüge aber durch den Einfluss von Umschichtungseffekten wieder auseinandergezogen zu werden, so dass nach einer Förderzone wieder eine stegfreie Zone zur Konsolidierung und Verdichtung erforderlich wird. Diese Vorstellung wird durch das Ergebnis des Schnecken-Experiments mit einer Schneckengeometrie gemäß Abb. 3-5 unterstützt. Obwohl anzunehmen ist, dass das Material zu Beginn der Presskammer durch den Schneckenkern und die Seiherkonfiguration mit Abstreifern stark verdichtet wird, baut sich danach über die Länge der Presskammer kein kritischer Pressdruck auf; die bereits erfolgte Konsolidierung wird wieder aufgelöst.

Gemäß dieser Modellvorstellung ist ein wesentliches Charakteristikum einer Kompressionszone nicht ausschließlich die Geometrie des Schneckenkerns sondern eine Aussparung des Schneckenstegs. Fehlt diese Aussparung

kann die Funktionalität der Kerngeometrie gänzlich aufgehoben werden. Das Ergebnis der Schnecken-Experimente mit einer Geometrie gemäß Abb.3-12 unterstreicht diese Vorstellung. Auch mit einer Aussparung des Schneckenstegs im Bereich der zylindrischen Elemente kann eine Konsolidierung in diesen Zonen eingeleitet werden.

Das Prinzip des Extruders, die Förderung des Materials gegen eine Drossel, funktioniert bei der Seiher-Schneckenpresse nur bedingt, denn dies hat zur Folge, dass die kritische Materialkompression erst kurz vor der Drossel überschritten wird. Damit ist aber das Ziel eines möglichst gleichmäßigen Expulsatablaufs über die Länge der Presskammer nicht zu realisieren. Die Äußerung von WARD [76], dass bei Seiher-Schneckenpressen die Wirkung einer Drossel am Mundstück viel zu spät einsetzt, zeigt das erzielte Ergebnis deutlich.

Die Geometrievariante mit einer degressiven Steigung des Schneckenstegs gemäß Abb. 3-14 führt gegenüber einem Steg mit konstanter Steigung zu einem deutlich höheren Expulsatabfluss. Wird die Modellvorstellung gemäß Abb. 1-9 zugrundegelegt, kommt in diesem Fall eine Überlagerung von radialer Kompression durch den progressiven Schneckenkern und eine axiale Kompression durch die degressive Schneckenhelix zum Tragen. Die Helixgeometrie ist in diesem Fall als ein wesentliches Element zur Erzeugung des schwierig zu erfassenden axialen Pressdrucks zu sehen. Dies unterstreicht die Ansicht EGGERS [29], dass von den Schneckenflanken ein axialer Druck ausgeübt wird, der das Material gegen die Reibwiderstände an Seiher und Schnecke in Bereiche kleiner werdender Fördervolumina presst.

4.1.2 Die Kerngeometrie

Die Reduzierung der Komprimathöhe wird bei technischen Schneckengeometrien durch eine Vergrößerung des Kerndurchmessers bei konstantem Seiherdurchmesser realisiert [12, 41, 72]. Im Arbeitsmodell wurde ein Kompression-Längenverhältnis κ als Charakteristikum für die Kerngeometrie eines Schneckenelements definiert.

Die Versuche unter Variation der Kompressionslängen L_K lassen in den erzielten Ergebnissen nur einen geringen Einfluss von κ auf den Preßvorgang erkennen. Viel wichtiger scheint im Vergleich zwischen dem 4-stufigen und 6-stufigen Schnecken-Experiment die Anzahl der Stufen und in der Folge die Stufenhöhe zu sein. Auf Grund dieser Erkenntnisse ist anzunehmen, dass für die Funktionalität der Kerngeometrie eines Kompressionselements die radiale

Komponente der Volumenreduktion, ausgedrückt durch Δz , von weitaus größerer Bedeutung ist, als die axiale, ausgedrückt durch κ . In der Schneckenpresse kann sich über den offenen Systemeingang und –ausgang offensichtlich ein angepasstes Strömungsgleichgewicht einstellen, das durch die Fließvorgänge im Komprimat reguliert wird.

4.1.3 Die Seiherkonfiguration

Die Konfiguration des Seiher kann durch die Länge des Seiher, durch die Variation der Anstellwinkel σ , durch den Einsatz von Abstreifplatten und die Variation der Seiherpalte s verändert werden.

Die Seiherlänge beeinflusst das Pressergebnis deutlich. Mit zunehmender Seiherlänge und einer entsprechenden Vergrößerung der Drainagefläche steigt der Abpressgrad und in der Folge der Massendurchsatz. Dieser Effekt wird auch in der Literatur beschrieben [18, 25, 44]. Im Vergleich zum 4-stufigen Pressversuch ist im 6-stufigen Pressversuch auch bei Materialien mit geringerer Schüttdichte ein deutlicher Anstieg der Pressdrücke bereits in der ersten Pressstufe festzustellen. Es ist anzunehmen, dass durch die feinere Stufung der längeren Schneckenwelle und der längeren Verweilzeit eine Konsolidierung der Komprimatpartikel früher eingeleitet wird. Der dadurch erzeugte früher einsetzende Gegendruck entgegen der Materialbewegung, der von Ward [76] als problematisch für den Einzugsvorgang angesehen wird, führt dann bereits in der ersten Pressstufe zu einer Überschreitung der kritischen Komprimatdichte und in der Folge zu einem Expulsatabfluss. Neben der Drainagefläche vergrößert sich mit einer Verlängerung des Seiher auch die Reibfläche für das Komprimat. In der Folge ist im 6-stufigen Schnecken-Experiment auch unter dem Aspekt eines höheren Massendurchsatzes eine höhere SME zu registrieren.

Die Variation des Anstellwinkels σ und in der Folge die Veränderung der Seiherinnenfläche bezüglich ihrer Funktion als Reibpartner für das Komprimat ist immer in Verbindung mit der Kraftreaktion des Komprimats zu sehen. In Verbindung mit einer Schneckenengeometrie gemäß Abb. 3-1 und einer niedrigen Kraftreaktion hat eine Veränderung von σ nach Abb. 2-9 keine deutliche Auswirkung auf das Pressergebnis. In Verbindung mit einer Schneckenengeometrie gemäß Abb. 3-9 und einer hohen Kraftreaktion bewirkt die gleiche Veränderung von σ zunächst eine starke Materialverdichtung durch einen zunehmend axialen Vorschub in den sich verengenden Pressraum. In der Folge kann das Volumen des stark komprimierten Materials aber nicht

mehr schnell genug reduziert und weitergeschoben werden. Der Massendurchsatz kommt auf Grund des feststehenden Materialpropfens zum Erliegen. Das die Funktion des Seiher nur durch die Wechselwirkung zwischen den elastischen Rückstellkräften des Komprimats und den auf Keil gestellten Seiherstäben gewährleistet werden kann, zeigen die erzielten Ergebnisse. Abstreifplatten, wie sie in technischen Pressen Stand der Technik sind, sind zur Unterstützung der Seiherfunktionalität nicht erforderlich.

In der Literatur werden zur Funktion der Seiherpalte nur wenige Angaben gemacht [18, 25]. In Abhängigkeit von der von WARD [76] beschriebenen Problematik, dass die Gefahr des Zurückfließens von Pressöl aus der Seiherkammer in Richtung des Druckgefälles gegeben ist, sind die Seiherpalte zu Beginn der Presskammer für einen gesicherten Expulsatabfluss hinreichend groß zu halten. Bei höheren Pressdrücken im hinteren Teil der Seiherkammer sind die Palte weiter zu verengen, um einen übermäßigen Feststoffaustritt über die Seiherpalte zu verhindern. Das bedeutet, dass die Größe der Seiherpalte in einem funktionalen Zusammenhang mit der Kraftreaktion des Komprimats, insbesondere mit dem Fluiddruck in der Seiherkammer stehen wird. Eine weitergehende Untersuchung zur Abhängigkeit der Seiherpalte von den übrigen Prozessparametern wurde im Rahmen dieses Vorhabens aber nicht durchgeführt.

4.1.4 Die Schneckendrehzahl

Die Feststellung, dass die Wellendrehzahl keinen wesentlichen Einfluss auf die Presstemperatur zu haben scheint [51], zeigt sich auch in den Versuchsergebnissen. Unter dem Aspekt einer schnelleren Materialbewegung und der damit verbundenen höheren Reibung wäre eine Abhängigkeit zwischen Drehzahl und Temperatur dahingehend zu vermuten, dass eine höhere Drehzahl einen Temperaturanstieg bewirken müsse. Diese Annahme findet in den erzielten Ergebnissen aber keine Bestätigung. Werden in diesem Zusammenhang die Werte der spezifischen mechanischen Energieeinleitung bei verschiedenen Drehzahlen miteinander verglichen, ist eine deutliche Abnahme der aufzubringenden Pressarbeit mit steigender Drehzahl festzustellen. Auf Grund der Tatsache, dass die eingeleitete mechanische Energie während des Pressvorgangs zum Teil in thermische Energie umgewandelt wird, müsste dann aber eine Temperaturabnahme zu verzeichnen sein. Es ist zu vermuten, dass hier die Materialreibung und Energieeinleitung miteinander konkurrieren und sich in ihrer Wirkung auf die Presstemperatur aufheben.

4.2 Die Komprimatreaktionen als "innere Größen"

Bei der Komprimatreaktionen als innere Größen ist zwischen der Bewegung in der Presskammer und der Kraftreaktion des Komprimats zu differenzieren. Die Komprimateneigenschaften beeinflussen ebenfalls das Pressergebnis, dass anhand der Massendurchsätze und der eingeleiteten Energie quantifiziert werden kann.

4.2.1 Die Komprimatbewegung

In der Literatur wird eine helixförmige Bewegung des Komprimats in der Presskammer beschrieben, ohne dass die Bewegungsverhältnisse näher quantifiziert werden. Das im Rahmen dieses Vorhabens entwickelte Verfahren der abschnittweisen Verweilzeitmessung ermöglicht eine Quantifizierung der axialen Vorschubgeschwindigkeit des Komprimats v_{ax} . Die Darstellungen der Ergebnisse unter Variation der Wellendrehzahl n (Abb. 3-35 und Abb. 3-36), der Kerngeometrie (Abb. 3-37 und 3-38) und der Komprimateneigenschaften (Abb. 3-39 und 3-40) lassen bereits Unterschiede im Verweilzeitverhalten des Komprimats erkennen, wobei sich die Drehzahl der Schneckenwelle als dominante Einflussgrösse darstellt. Die Vergleichbarkeit der Graphen wird mit einer Normierung von v_{ax} durch die Division mit u_{ax} erleichtert. Der sich ergebende Quotient wurde im Arbeitsmodell als Förderwirkungsgrad α hergeleitet und definiert. Wird α für jeden Injektionsort j (vgl. Abb. 2-3) berechnet und über die Seiherlänge aufgetragen, treten die unterschiedlichen Einflüsse der verschiedenen Faktoren deutlicher hervor.

In Abb. 4-1 sind die sich ergebenden Förderwirkungsgrade im Schnecken-Experiment für Schälfflocken unter Variation der Drehzahl und der Seiherlänge aufgetragen. Mit steigender Drehzahl zeigen sich zunehmend Unterschiede zwischen den Förderwirkungsgraden im 4-stufigen und 6-stufigen Schnecken-Experiment. Die normierte Darstellung der erzielten Ergebnisse führt zu der Erkenntnis, dass die axiale Bewegung des Komprimats und infolge dessen die Pressgeschwindigkeit durch die Wechselwirkung von Seiherlänge und Wellendrehzahl deutlich beeinflusst werden.

- Bei $u_{ax} = 5,25 \text{ mm/s}$ stellen sich im Bereich der ersten vier Seiherfelder gleiche Förderwirkungsgrade ein.
- Bei $u_{ax} = 10,5 \text{ mm/s}$ wird der Förderwirkungsgrad des 6-stufigen Schnecken-Experiments in der 4-stufigen Variante erst am Ende der Presskammer erreicht.

- Bei $u_{ax} = 15,75 \text{ mm/s}$ wird der Förderwirkungsgrad des 6-stufigen Schnecken-Experiments in der 4-stufigen Variante nicht mehr erreicht.

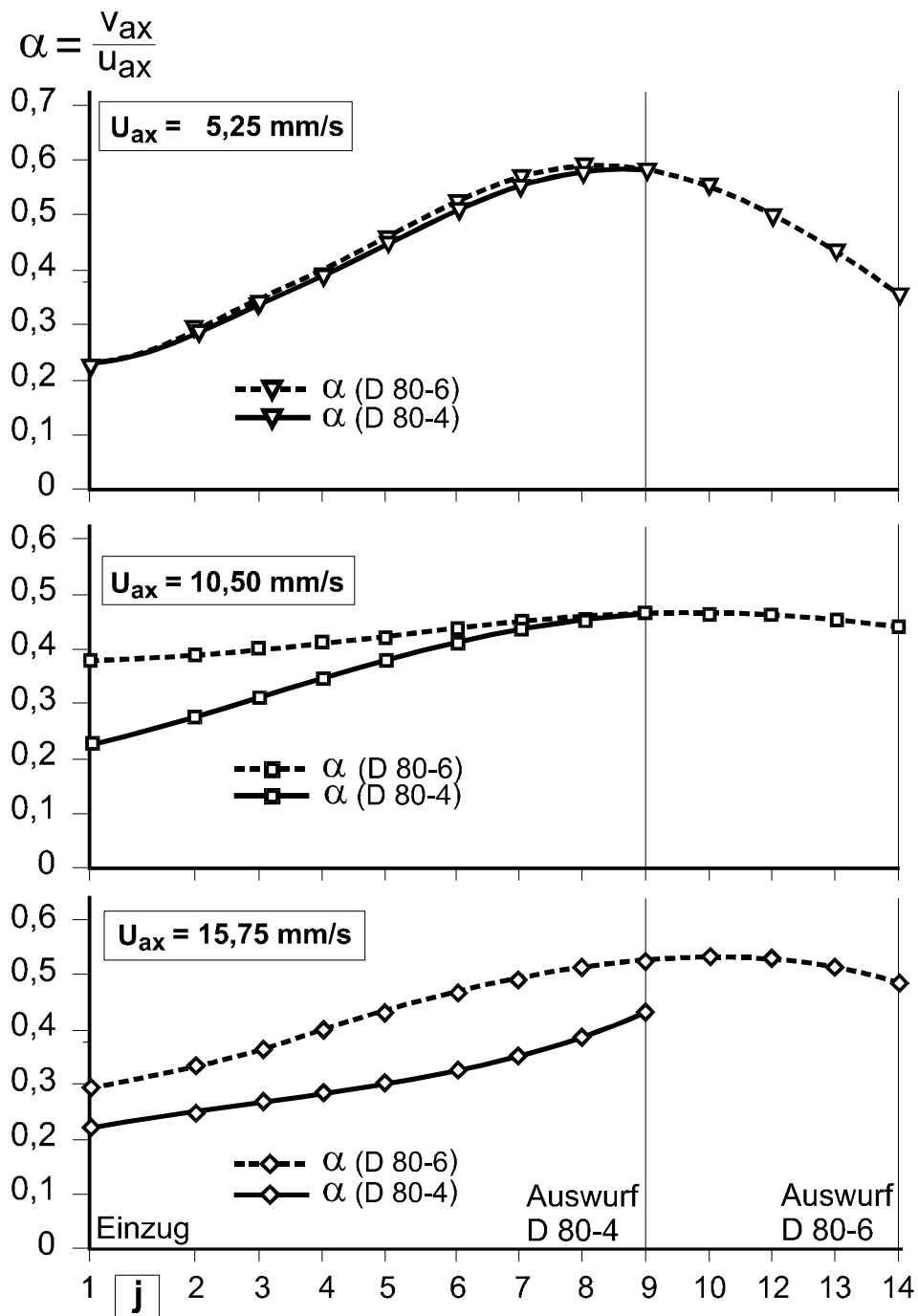


Abb. 4-1: Vergleich des axialen Förderwirkungsgrads α bei der Verarbeitung von Schälfflocken im 6-stufigen und 4-stufigen Schnecken-Experiment ($\kappa = 0,5$) unter Variation von Drehzahl und Seiherlänge

Die Modellvorstellung, dass die Reaktion des Komprimats durch die "äußeren Größen" Geometrie und Drehzahl bestimmt werden, findet in diesem Ergebnis eine Bestätigung und lässt sich näher quantifizieren. Eine höhere Drehzahl führt bei einem kürzeren Seiher zu einem Rückgang des axialen Vorschubs und somit zu einem erhöhten Schlupf zwischen Schnecke und Komprimat.

In Abb. 4-2 ist die Abhängigkeit von α für Schälfflocken unter der Variation von Seiherlänge und Kerngeometrie dargestellt. Die Variante mit $\kappa = 0,5$ ist in Abb. 4-1 für $u_{ax} = 10,5$ mm/s dargestellt. Dabei zeigt sich nochmals deutlich, dass die Kerngeometrie das Pressergebnis kaum beeinflusst. Die Verläufe der Graphen scheinen aber prägnant für die gewählte mittlere Drehzahl zu sein. Daraus ist zu schließen, dass auch hier die Drehzahl als dominante Größe die Materialbewegung zu beeinflussen scheint.

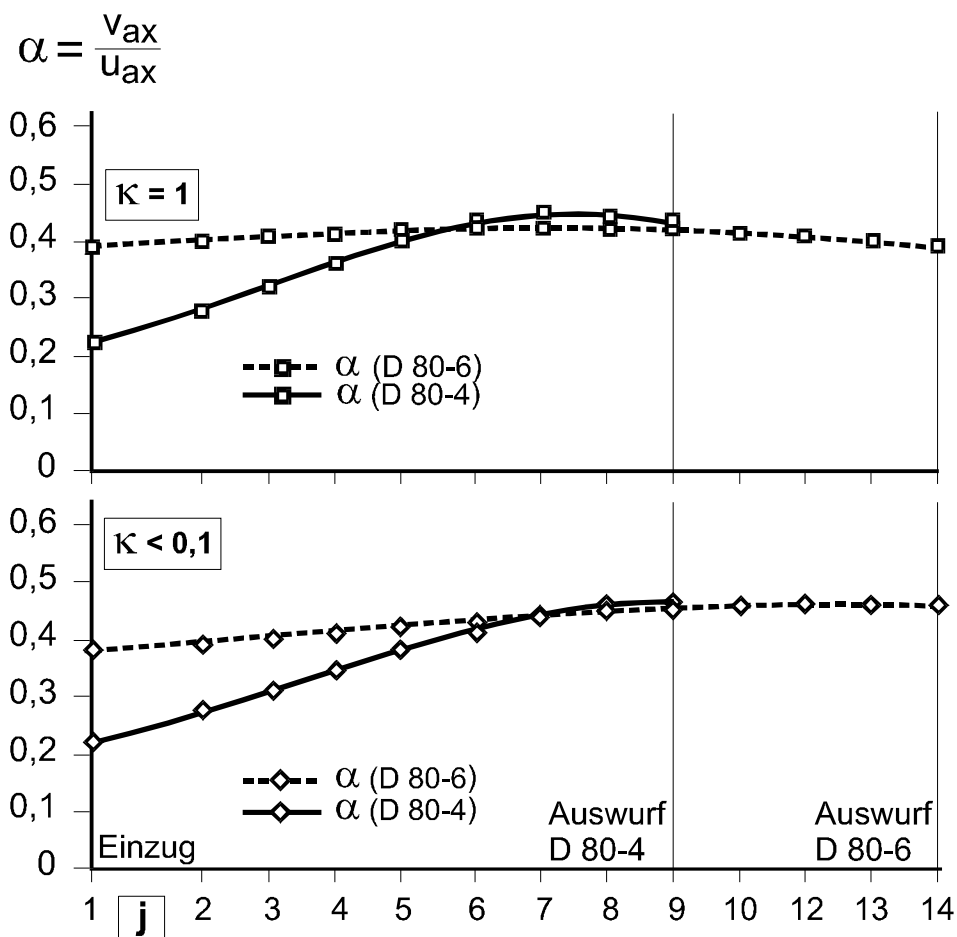


Abb. 4-2: Vergleich des axialen Förderwirkungsgrads α bei der Verarbeitung von Schälfflocken im 6-stufigen und 4-stufigen Schnecken-Experiment ($u_{ax} = 10,5$ mm/s) unter Variation von Kerngeometrie und Seiherlänge

Für die in Abb. 4-3 dargestellte Abhängigkeit von α unter der Variation von Seiherlänge und Komprimateneigenschaften zeigt sich ein ähnliches Bild; die Variante mit Schälfflocken ist in Abb. 4-1 für $u_{ax} = 10,5 \text{ mm/s}$ dargestellt. Die Verläufe scheinen wieder typisch für die mittlere Drehzahl. Der Einfluss unterschiedlicher Komprimateneigenschaften ist gering.

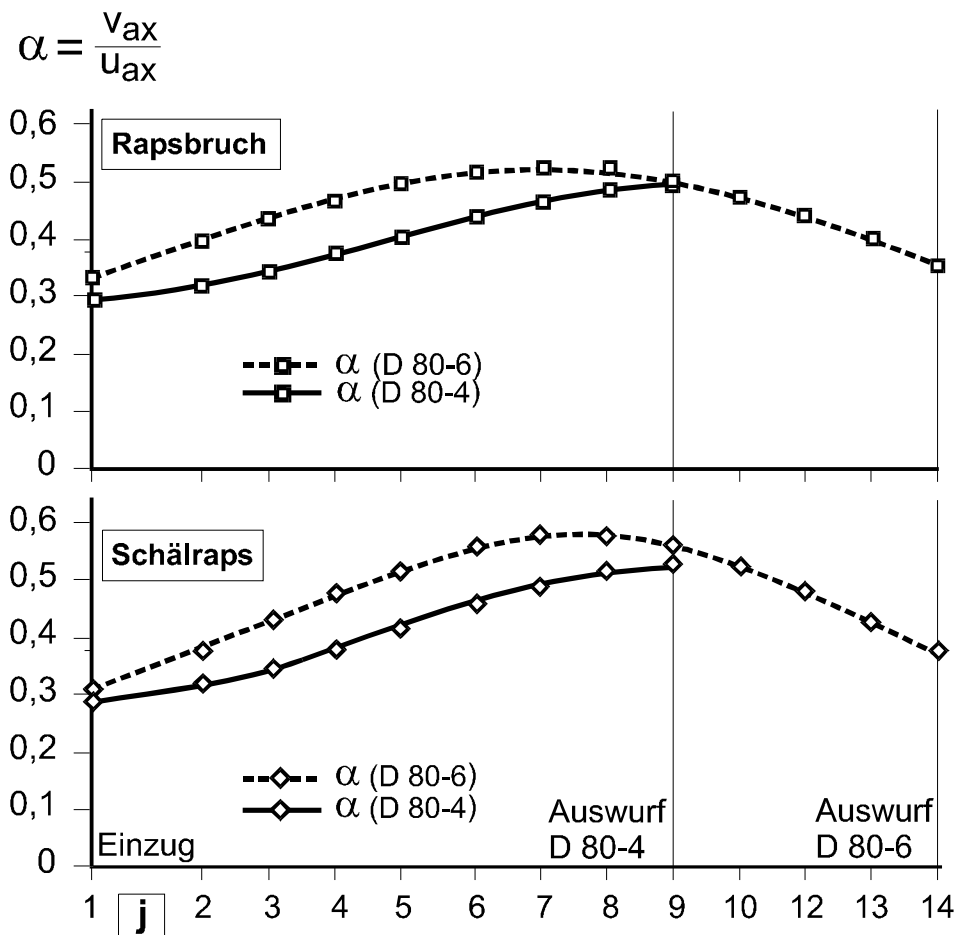


Abb. 4-3: Vergleich des axialen Förderwirkungsgrads α bei der Verarbeitung von Schälfflocken im 6-stufigen und 4-stufigen Schnecken-Experiment ($u_{ax} = 10,5 \text{ mm/s}$; $\kappa = 0,5$) unter Variation von Komprimat und Seiherlänge

4.2.2 Die Kraftreaktion des Komprimats

Aus der Praxis ist eine anisotrope Druckausbreitung bei komprimierten Ölsaaten bekannt [28], wie sie auch im Arbeitsmodell in Abb. 1-14 dargestellt ist. Praktisch gemessen werden kann die radiale Komponente des Pressdrucks, der entlang der Presskammer auf die Seiherwand einwirkt.

In Abb. 4-4 ist im unteren Diagramm die Veränderung der Kraftreaktion des Komprimats an den über die Länge der Presskammer verteilten Druckmessstellen während des Anfahrvorgangs bis zum Gleichgewichtszustand dargestellt. Werden die gemessenen und gemittelten Drücke für jeden Zeitpunkt aufsummiert und normiert, ergibt sich ein Graph, wie er in Abb. 4-4 im oberen Diagramm dargestellt ist. Wird über diesen Graphen die aufgenommene elektrische Leistung des Pressenmotors normiert aufgetragen, so ergibt sich ein annähernd identischer Verlauf. Eine Abhängigkeit von Pressdruck und Leistungsaufnahme des Pressenmotors wird in der Literatur beschrieben [40, 48, 78]. Aus Abb. 4-4 ist zu erkennen, dass diese Abhängigkeit sich als direkte Proportionalität zwischen aufzubringender Pressenergie und integralem Pressdruck erweist.

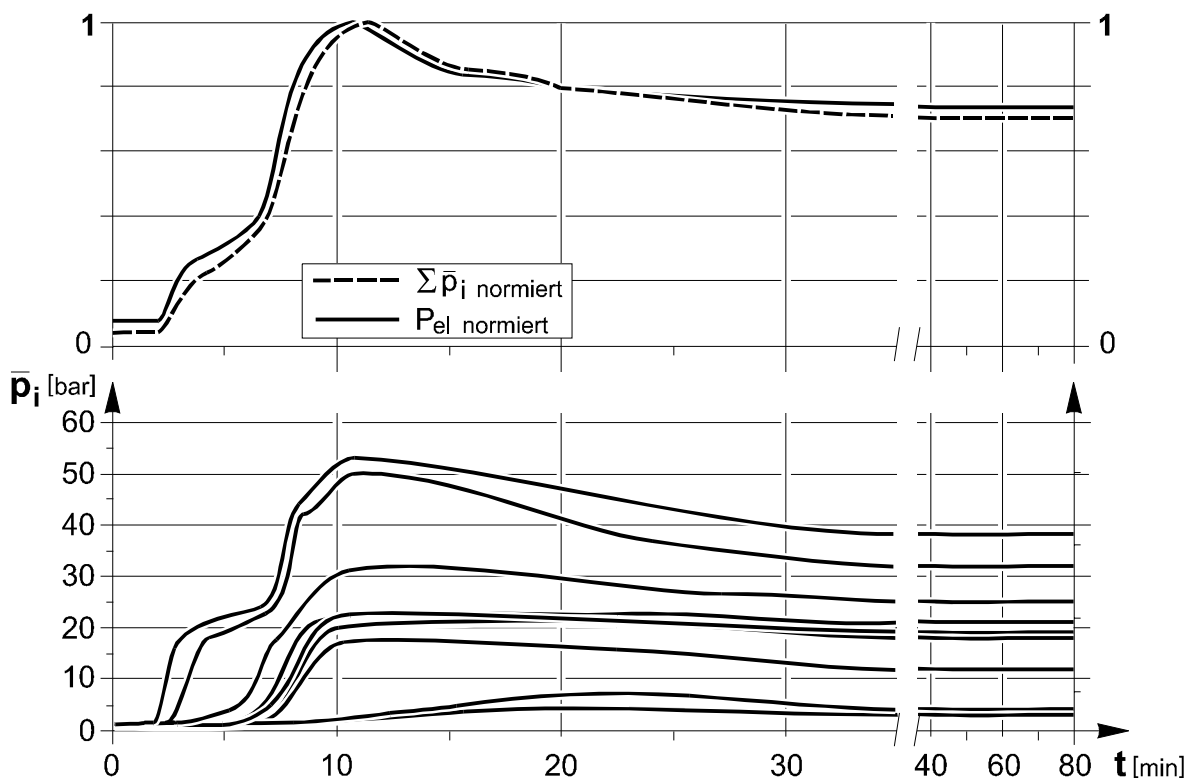


Abb. 4-4: Proportionalität zwischen der aufgenommenen elektrischen Leistung des Pressenmotors und den integralen Pressdrücken; Schnecken-Experiment D 80-6, Schälrap, $u_{ax} = 10,5 \text{ min}^{-1}$

Die Messung der zum Pressen aufzubringenden Energie ist nur integral über die angetriebene Schneckenwelle möglich. Wird aber die Proportionalität zwischen Pressenergie und Pressdruck auch für den gemessenen lokalen Pressdruck unterstellt, dann würde das über die Länge der Presskammer gemessene Druckprofil ein skaliertes Abbild der über die Seiherlänge aufzubringenden Pressenergie darstellen. Ob eine einfache Übertragung des Proportionalitätskoeffizienten zwischen dem summiertem integralen Pressdruck und der integralen Leistungsaufnahme auf das gemessene Druckprofil zur Quantifizierung der Energieverteilung über die Länge der Seiherkammer möglich ist, erfordert weitergehende Untersuchungen.

Zwischen dem 4-stufigen und 6-stufigen Schnecken-Experiment sind deutlich qualitative und quantitative Unterschiede im gemessenen Druckprofil zu erkennen. Während im 4-stufigen Experiment ein stetig ansteigendes Druckprofil zu erkennen ist, zeigt sich im 6-stufigen Experiment ein in der letzten Stufe abfallendes Druckniveau mit der Folge eines bogenförmigen Druckprofils, wie es auch in der Literatur beschrieben wird [35, 40, 48, 49, 76]. Im Vergleich zwischen den Druckprofilen und den Verläufen der axialen Vorschubgeschwindigkeit des Komprimats v_{ax} sind ebenfalls proportionale Verhältnisse festzustellen. Während im 4-stufigen Schnecken-Experiment ein stetiges Ansteigen von v_{ax} festzustellen ist, kann im 6-stufigen Experiment ein bogenförmiger Verlauf von v_{ax} registriert werden. Diese Proportionalität bestätigt das von SCHNEIDER aufgestellte Modell [68], dass die sich aus der Kraftreaktion ergebenden elastischen Rückstellkräfte des Komprimats Voraussetzung für eine Tangentialreibung am Seiher und damit eine axiale Bewegung des Materials in der Presskammer sind.

Die Kraftreaktion des Komprimats und in der Folge dessen elastische Rückstellkräfte werden durch die Komprimateneigenschaften stärker beeinflusst als dies bei der Komprimatbewegung der Fall ist. In der Literatur wird beschrieben, dass der durch Reibung und Scherkräfte bewirkte Saataufschluss in der Presse einen wesentlichen Energieeinsatz erfordert [20, 29]. Dieses Erkenntnis spiegelt sich auch in den erzielten Ergebnissen wider. Bei einem höheren Aufschlussgrad der Saat ist eine deutlich niedrigere Kraftreaktion des Komprimats und in der Folge auch eine deutlich geringere Wärmeentwicklung zu registrieren. Die hohen elastischen Rückstellkräfte der Rapshüllen [60] spiegeln sich auch in den hohen gemessenen Radialdrücken wider.

4.2.3 Die Komprimateneigenschaften

Der direkte Vergleich der Ergebnisse aus dem Linear- und dem Schnecken-Experiment hat gezeigt, dass aus dem Komprimatverhalten unter einachsiger Beanspruchung Rückschlüsse für das Komprimatverhalten unter einer kombinierten Beanspruchung aus Kompression und Scherung zu ziehen sind.

Die Bedeutung des Wassergehalts für das Komprimatverhalten hat sich in den Ergebnissen des Linear-Experiments deutlich gezeigt. Ein zu hoher Wassergehalt führt bei hüllenreduzierter Saat zu einem stark plastischen Verhalten unter Kompression. Eine Verschlechterung der Komprimatdrainage auf Grund verschlossener Abflusswege und ein Ansteigen des Komprimatdrucks, insbesondere des Fluiddrucks sind die Folge. Im Schnecken-Experiment zeigt ein Komprimat mit gleichen Eigenschaften ein entsprechendes Verhalten. Die plastische Feststoffmatrix und die schlechte Komprimatdrainage führen zu einem instationären Betriebsverhalten. Die im Linear-Experiment festgestellte Verbesserung der Komprimatdrainage bei einem hohen Wassergehalt durch einen Materialaufschluss zeigt sich auch in den Schnecken-Experimenten.

Der in den Linear-Experimenten festgestellte Einfluss des Hüllengehalts auf das Komprimatverhalten zeigt sich auch in den Ergebnissen des Schnecken-Experiments. Die elastischen Eigenschaften der Hüllen dominieren das Pressergebnis unabhängig vom Wassergehalt des Komprimats. Die Komprimatdrainage wird durch einen nativen Hüllengehalt auch bei höheren Wassergehalten positiv beeinflusst. Ein hüllenreduziertes Material mit einem hohen Wassergehalt kann mit einem nativen Hüllengehalt in der Schneckenpresse verarbeitet werden. Die hohen Rückstellkräfte der elastischen Hüllen unterstützen dabei die axiale Materialförderung und in der Folge den Massendurchsatz.

Besonders deutlich zeigen sich die elastischen Eigenschaften der Hüllen in den Versuchen unter Variation der Kerngeometrie (Abb. 3-28 bis Abb. 3-33). Die hohen Rückstellkräfte im Komprimat führen im Vergleich mit den hüllenreduzierten Komprimaten zu deutlich höheren Pressdrücken. Nachteile sind ein besonders hoher Energieaufwand und im Vergleich sehr hohe Expulsatablauftemperaturen. Die erhöhte Reibungswärme zeigt sich auch in den Thermographien.

Die Verbesserung der Komprimatdrainage von hüllenreduzierter Saat mit hohem Wassergehalt durch eine Erhöhung des Aufschlussgrads zeigt sich in den Ergebnissen der Linear- und Schnecken-Experimente. Die in der Konditionierstufe aufgebrauchte Aufschlussarbeit muss nicht mehr in der Presse aufgewendet werden.

Durch die Kombination von reduziertem Hüllengehalt und Materialaufschluss stellen sich im Vergleich die kleinsten Pressdrücke ein. Vorteil der niedrigen Kraftreaktion des Komprimats sind ein entsprechend geringer Energieaufwand und sehr niedrige Expulsatablauftemperaturen. Dem gegenüber fallen der Massendurchsatz und die abgepresste Expulsatmenge entsprechend geringer, bzw. die Restölbeladung im Pressschilfer entsprechend hoch aus.

Die im Linear-Experiment festgestellten konkurrierenden Effekte einer Abnahme der Ölviskosität und eines zunehmend plastischen Komprimatverhaltens mit steigender Presstemperatur zeigt sich auch im Schnecken-Experiment. In Verbindung mit einer Denaturierung der Feststoffmatrix ist eine nur unwesentliche Veränderung des Pressergebnisses zu erzielen. Negativer Effekt ist die deutliche Erhöhung des Phosphorgehalts im Öl.

4.3 Das Transformationsmodell Schneckenpresse/Linearpresse

Das von RAß [60] entwickelte Transformationsmodell zur Übertragung des Pressregimes in einer Schneckenpresse auf ein Linear-Experiment wurde auch im Rahmen dieses Vorhabens angewendet. Es kann jedoch nur als eine erste Annäherung an die realen Vorgänge in der Schneckenpresse betrachtet werden. Auf Grund der komplexen Wechselwirkungen im System Seiher/Schnecke scheint die Entkopplung durch Übertragung auf eine Zylinder/Kolben-Geometrie grundsätzlich der richtige Weg zu sein. Jedoch ist das Übertragungsmodell zu verfeinern.

Die erzielten Ergebnisse, insbesondere die Untersuchungen zum Einfluss der Helix- und der Kerngeometrie, zeigen die Grenzen des verwendeten Modells auf. In den Abb. 4-5, Abb. 4-6 und Abb. 4-7 sind die Ergebnisse aus Linear-Experimenten dargestellt. Dabei wurde nach dem verwendeten Transformationsmodell die Kerngeometrie von 6-stufigen Schnecken-Experimenten gemäß Abb. 2-8 jeweils auf ein 6-stufiges Pressregime in der Linearpresse übertragen.

Das Pressregime in Abb. 4-5 entspricht bis auf Versuchslänge und Stufenzahl dem angewendeten Modell. Gegenüber dem in Abb. 3-18 dargestellten 4-stufigen Pressregime macht sich hier die feinere Abstufung der sechs Kompressionsstufen durch noch niedrigere Gesamtdrücke und kaum messbare Fluiddrücke bemerkbar. Dieses Ergebnis spiegelt sich auch in den Schnecken-Experimenten wieder (Abb. 3-11 und Abb. 3-19).

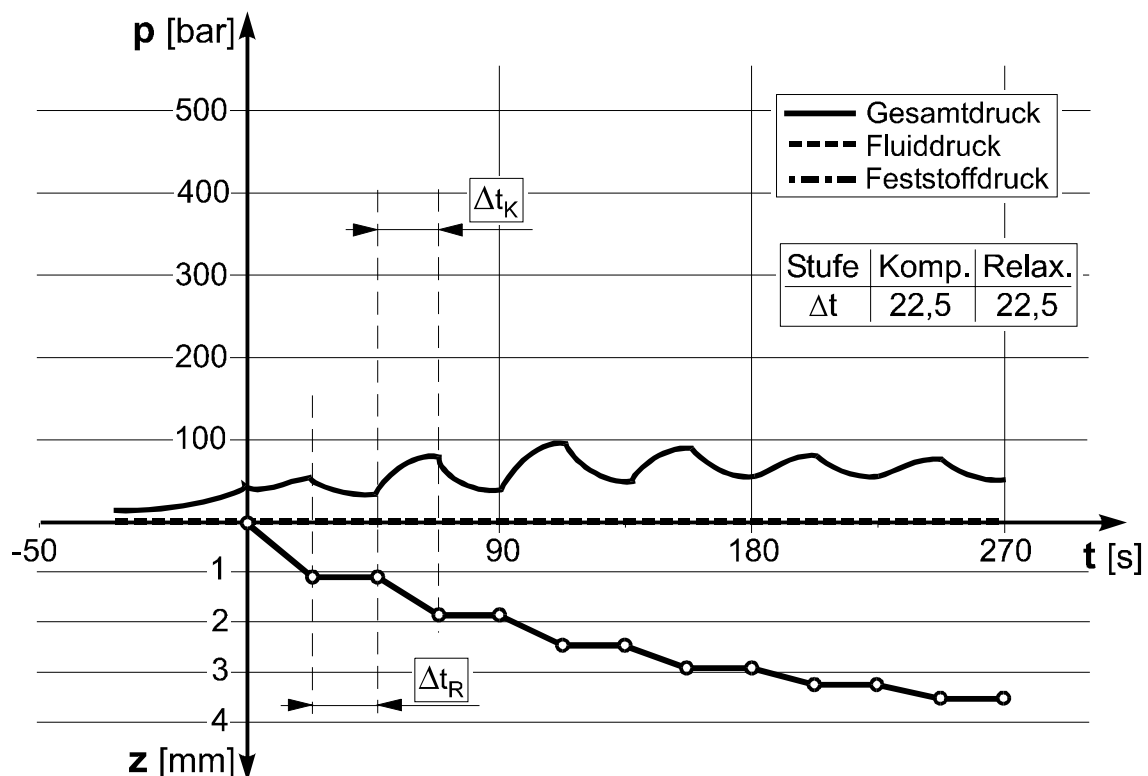


Abb. 4-5: Linear-Experiment: 6-stufiges Pressregime; Schälrapis; Rückübertragung von Schnecken-Experiment D 80-6, $\kappa = 1$

Die Verkürzung der Kompressionslängen auf $\kappa = 0,5$ führt bei der Übertragung auf das Linear-Experiment zu einer leichten Erhöhung der Gesamt- und Fluiddrücke. Das in Abb. 4-6 dargestellte Profil der gemessenen Drücke ist dem Pressregime entsprechend durch einen sägezahnartigen Verlauf charakterisiert. Auf Grund der guten Drainage ist das Komprimat in der Lage während der verlängerten Relaxationsphasen den aufgeprägten Druck abzubauen.

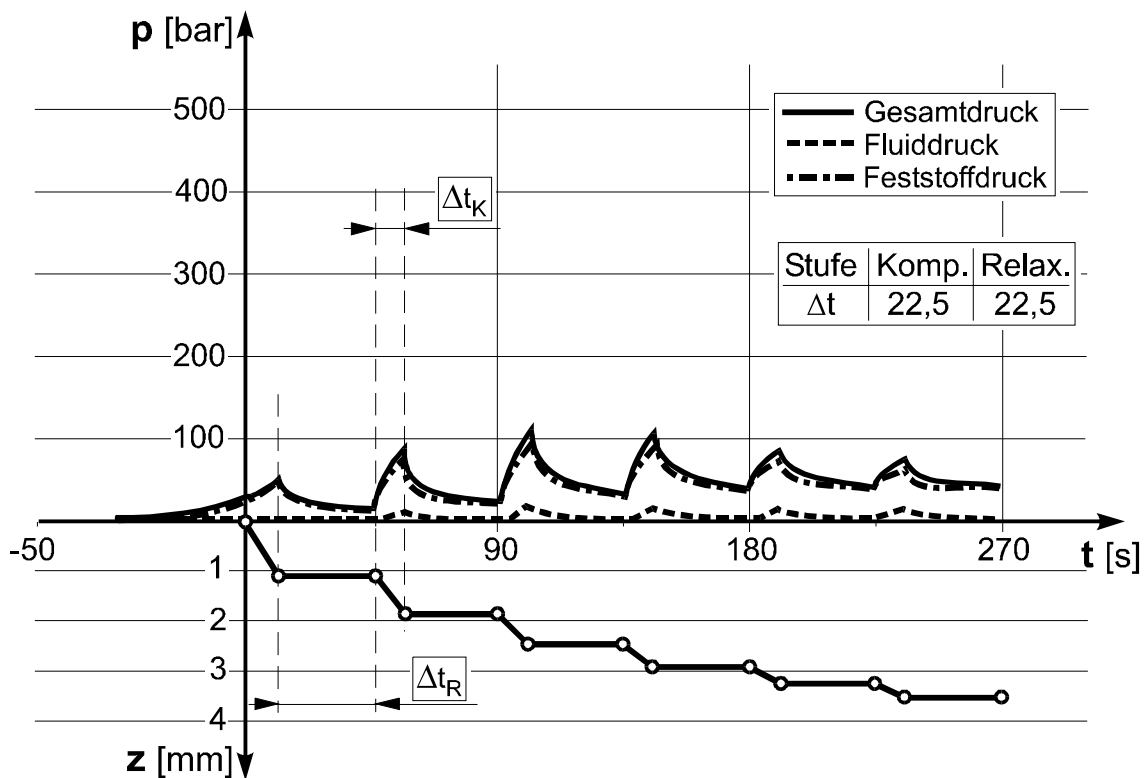


Abb. 4-6: Linear-Experiment: 6-stufiges Pressregime; Schälraprs;
Rückübertragung von Schnecken-Experiment D 80-6, $\kappa = 0,5$

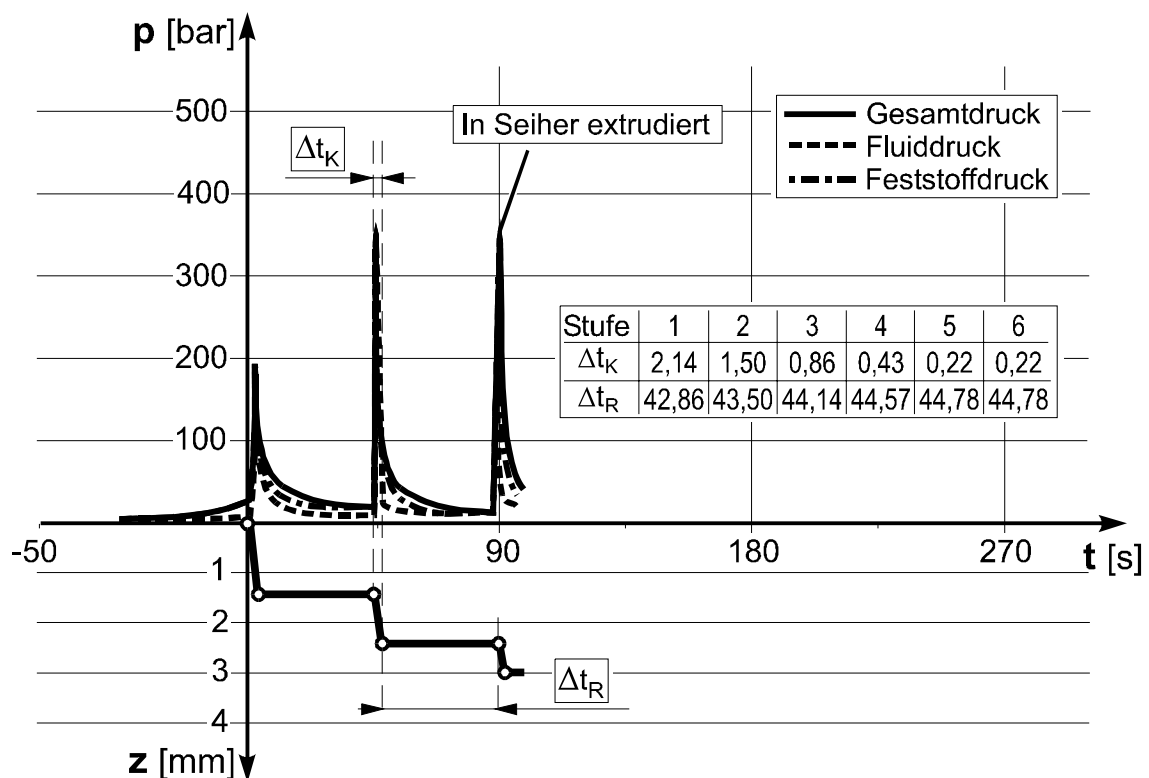


Abb. 4-7: Linear-Experiment: 6-stufiges Pressregime; Schälfflocken;
Rückübertragung von Schnecken-Experiment D 80-6, $\kappa < 0,1$

In Abb. 4-7 ist das Ergebnis eines Pressregimes dargestellt, bei dem die Kompressionslängen stark verkürzt werden ($\kappa < 0,1$). Während im Schnecken-Experiment kaum ein Einfluss der Kerngeometrie auf die Kraftreaktion des Komprimats und infolge dessen auf das Pressergebnis festgestellt werden kann (Abb. 3-28 bis Abb. 3-33), steigen die Komprimatdrücke, insbesondere die Fluiddrücke während der extrem kurzen Kompressionsphasen im Linear-Experiment so stark an, dass das Komprimat bereits in der dritten Stufe durch den Seihher extrudiert und der Versuch abgebrochen werden muss. Eine direkte Transformation der Kerngeometrie führt hier nicht zu einer entsprechenden Abbildung des Pressergebnisses im Schnecken-Experiment.

Bezüglich der Helixgeometrie (Kap. 3.1) ist festzustellen, dass in dem verwendeten Transformationsmodell dieser Einfluss auf das Pressergebnis im Schnecken-Experiment nicht berücksichtigt wird. Eine Helixgeometrie mit geschlossenem Schneckensteg gemäß Abb. 3-1 führt zu einem gänzlich anderen Pressergebnis als mit unterbrochenem Schneckensteg gemäß Abb. 3-9. Auch die Positionierung der Unterbrechungen, z.B. im Bereich der zylindrischen Schneckenelemente gemäß Abb. 3-12, hat einen Einfluss auf das Pressergebnis. Die Formulierung eines Transformationsmodells zwischen Schnecken- und Linear-Experiment mit einer Berücksichtigung der geometrischen Einflussgrößen erscheint schwierig und erfordert weitergehende Untersuchungen.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde in einem ersten Ansatz versucht, die Problematik der Transformation zwischen Schnecken- und Linear-Experiment durch ein kraftgesteuertes Linear-Experiment zu untersuchen. Der Grundgedanke ist, das Pressergebnis aus dem Schnecken-Experiment, insbesondere die Kraftreaktion und die Bewegung des Komprimats, als Führungsgrösse für das Linear-Experiment zu nutzen. Als Folgegrösse ergibt sich die Bewegung des Kolbens und in der Folge die Komprimathöhe z.

Inwieweit dieses Arbeitsmodell Rückschlüsse auf die Vorgänge in der Seiherkammer zulässt, kann im Rahmen dieses Vorhabens nicht untersucht werden. Die Regelungselektronik der eingesetzten Universalprüfmaschine arbeitet mit einer Analogtechnik, die nicht in der Lage ist die vorgegebenen Kraftverläufe exakt nachzufahren. Mit einer geeigneten Versuchseinrichtung könnte das kraftgesteuerte Linear-Experiment jedoch wichtige Informationen für die Formulierung eines verbesserten Transformationsmodells liefern.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

5.1 Schlussfolgerungen

Das kontinuierliche Trennpressen biogener Feststoffe in einer Seiher-Schneckenpresse stellt sich als komplexer Vorgang mit zahlreichen Wechselwirkungen im System Presse/Komprimat dar. Im Hinblick auf eine schonende Verarbeitung von Hüllen reduzierter Rapssaat sind bezüglich der untersuchten Systemparameter die nachfolgenden Schlussfolgerungen zu ziehen:

Die **Helixgeometrie** ist zugunsten einer frühen Konsolidierung der losen Saatschüttung in der Presskammer mit Unterbrechungen des Schneckensteges im Bereich der Relaxationsabschnitte auszuführen. Eine Helixgeometrie mit degressiver Stegsteigung führt zu höheren Abpressgraden, im Gegenzug aber auch zu höheren Temperaturen des ablaufenden Pressöls.

Die Stufung der **Kerngeometrie** ist im Hinblick auf ein gleichmäßiges Druckprofil über die Seiherlänge in den Steigungen der Kompressionszonen degressiv auszulegen; eine höhere Stufenzahl führt zu einer feineren Abstufung der Kompression insbesondere in den Bereichen höherer Kompressionsgrade

Die **Seiherkonfiguration** ist zugunsten einer ungestörten Tangentialreibung am Seiher ohne Abstreifplatten auszuführen. Die frühzeitige Konsolidierung der losen Schüttung kann zu Beginn der Presskammer durch einen stärkeren Anstellwinkel der Seiherstäbe erreicht, auf eine Enddrossel vor dem Mundstück kann aufgrund der begrenzten Wirkung im Endbereich der Presskammer verzichtet werden.

Die **Seiherlänge** ist zugunsten einer feineren Abstufung der Kerngeometrie, einer größeren Drainagefläche und einer längeren Verweilzeit des Komprimats zu größeren Verhältnissen von L/D auszulegen. Aufgrund des steigenden Drehmoments ist dabei die ansteigende spezifische mechanische Energieeinleitung zu beachten.

Die **Schneckendrehzahl** ist bezogen auf die Seiherlänge für kleinere Verhältnisse von L/D zu reduzieren, um die Einstellung eines günstigen axialen Förderwirkungsgrades α zu unterstützen.

5.2 Ausblick

Die Maßstabsveränderung von Schneckenmaschinen, das scale-up oder scale-down stellt eine interessante Zielsetzung für weiterführende Untersuchungen dar. Sie erfordert aber fundierte Kenntnisse über das System und deren Wechselwirkungen. Grundsätzlich können zwei parallele Wege zur Entwicklung einer Modelltheorie für Seiher-Schneckenpressen beschritten werden. In einem ersten Schritt können bereits vorhandene Modelltheorien von verwandten Maschinentypen herangezogen werden, in einem zweiten Schritt sind experimentelle Untersuchungen an Baureihen von Seiher-Schneckenpressen durchzuführen.

Die technische Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Seiher-Schneckenpressen zur Ölsaatenverarbeitung erfolgte meist auf empirischem Weg. Dadurch sind Ansätze zur Maßstabsveränderung im Gegensatz zu anderen Schneckenmaschinen, z.B. den Kunststoff-Extrudern, noch wenig entwickelt. Tab. 7-19 gibt einen Überblick über Modelltheorien für Schneckenmaschinen und deren Parametersätze für unterschiedliche Modellansätze. Nur eine Arbeit von ALYMOV [15] behandelt das Problem der Modellübertragung für Seiher-Schneckenpressen im Ansatz. In Abb. 5-1 ist ein Schema für die prinzipielle Vorgehensweise zum Problem der Ähnlichkeitsanalyse zwischen Schneckenmaschinen mit verschiedenen verfahrenstechnischen Aufgaben dargestellt.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde eine Maßstabsveränderung im Schnecken-Experiment durch eine Verlängerung des Seihers realisiert. Die erzielten Ergebnisse sind bezüglich der Geometrievarianten nicht umfangreich genug, um als Basis für einen Modellansatz dienen zu können. Die Formulierung einer Modelltheorie zur Maßstabsveränderung von Seiher-Schneckenpressen erfordert weitere Experimente unter Variation der Seiherslänge und des Seiherdurchmessers in verschiedenen Abstufungen.

Ähnlichkeits-Problem 2. Ordnung:
Schneckenmaschinen mit
verschiedenen verfahrenstech. Aufgaben

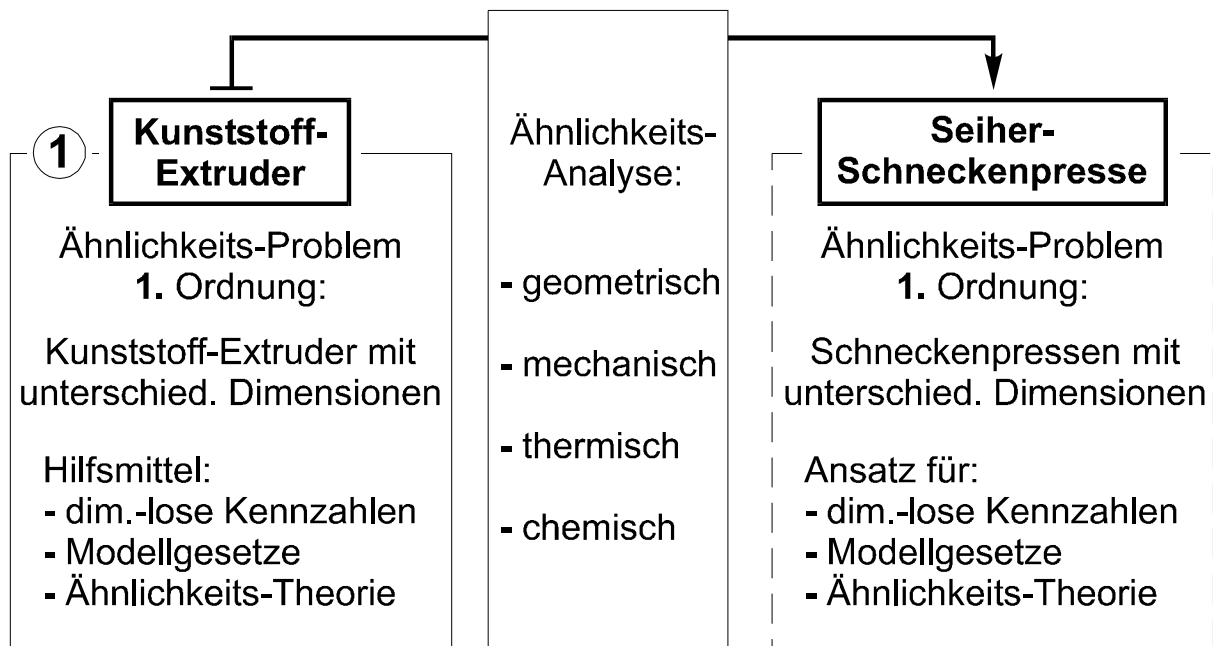


Abb. 5-1: Schematische Vorgehensweise zum Problem der Ähnlichkeits-analyse zwischen Schneckenmaschinen mit verschiedenen verfahrenstechnischen Aufgaben

6 Literaturverzeichnis

- [1] *Englisches Patent; Bramah*, Presse; 1795.
- [2] *Englisches Patent Nr. 12611; H. Bessemer und J. Haywood*, Presse; 1849
- [3] *Englisches Patent. Nr. 25927; W. Bushell und W.T. Haydon*, Stabseiher; 1882.
- [4] *D.R.P. Nr. 230; A. Martikke und F. Siegel*, Rübenbrei-Presse; 1877.
- [5] *D.R.P. Nr. 157221; V.D. Anderson*, Presse zum Auspressen von Öl aus Samen u. dgl. mit zwei oder mehreren konachsialen, in der gleichen Richtung sich drehenden Schnecken; 1903.
- [6] *D.R.P. Nr. 157644; V.D. Anderson*, Presse zum Auspressen von Öl aus Samen u. dgl. mit zwei oder mehreren konachsialen, in der gleichen Richtung sich drehenden Schnecken; 1903.
- [7] Landesarchiv Magdeburg –LHA- Rep. J28 Krupp Grusonwerk AG, Magdeburg, Nr. 190
- [8] *T.B. 8, Instruktionsheft Nr. 1*, „Einrichtungen von Ölfabriken zur Erzeugung von vegetabilen Ölen mit Ausnahme von Palmfruchtaufbereitungsmaschinen“, Landesarchiv Magdeburg –LHA- Rep. J28 Krupp Grusonwerk AG, Magdeburg, Nr. 424.
- [9] *D.R.P. Nr. 473123; Fried. Krupp Grusonwerk Akt.-Ges.*, Schneckenpresse für ölhaltiges Gut; 1927.
- [10] *D.R.P. Nr. 625549; Naamllooze Vennootschap: Maatschappij tot Exploitatie van "ten Bosch Octrooien N. V." in Arnhem, Holland*, Schneckenpresse, bei der die Steigung der Pressschnecke vom Einlass zum Auslass hin abnimmt 1936
- [11] *D.R.P. Nr. 649639; Fried. Krupp Grusonwerk Akt.-Ges.*, Schneckenpresse für feuchtes Gut, 1937.
- [12] *Maschinenfabrik Reinartz GmbH & Co KG, 4040 Neuss, DE*: Schneckenpresse, Deutsches Patentamt, Gebrauchsmuster G 92 07 096.5 vom 08.10.1992
- [13] *Alymov, V.T.*, Berechnung der technischen Hauptcharakteristiken des techno-logischen Weges der hochleistungsfähigen Schneckenpresse, Leningrad, VNIIZ, Trudy, (1971), Nr. 28, S. 73 - 83.
- [14] *Alymov, V. T.*, Die Veränderung der Dichte der gepressten Maische und der Säurezahl des Öles in Abhängigkeit vom Auspressgrad in Schneckenmaschinen, Leningrad, VNIIZ, Trudy, (1971), Nr. 28, S. 84 - 89.
- [15] *Alymov, V.T. und V.V. Beloborodov*, Kriterielle Gleichung zum Vorgang des Abpressens von Öl in Schneckenmaschinen, Leningrad, VNIIZ, Trudy,(1970), Nr. 27, S. 83 - 89.

- [16] *Alymov, V.T. und V.V. Beloborodov*, Eine Näherungsmethode zur Bestimmung der Bewegungsbedingungen beim Auspressen von Fett in Schneckenmaschinen, Leningrad, VNIIZ, Trudy, (1970), Nr. 27, S. 73 - 81.
- [17] *Alymov, V.T. und V.V. Beloborodov*, Die Durchlässigkeit der gepressten Maische und ihr Einfluss auf das Abpressen in Schneckenmaschinen, Leningrad, VNIIZ, Trudy, (1970), Nr. 27, S. 56 - 63.
- [18] *Alymov, V.T.*, Berechnung des Pressweges in Schneckenmaschinen, Leningrad, VNIIZ, Trudy, (1970), Nr. 27, S. 64-72.
- [19] *Alymov, V.T. und V.V. Beloborodov*, Bestimmung des Druckes von deformierten Poren der Maische auf die Flüssigkeit während des Pressens in Schneckenmaschinen, Leningrad, VNIIZ, Trudy, (1970), Nr. 27, S. 90 - 98.
- [20] *Austmeyer, K.E.*, Verfahrenstechnische Grundlagen der Schnitzel-entwässerung. Teil 3: Technische Pressarbeit, Zuckerind., **112**(1987), Nr. 11, 946-950.
- [21] *Beloborodov, V.V.*, Die Grundprozesse der Erzeugung pflanzlicher Öle, Moskau, Piscevaja Promyslennost, 1966.
- [22] *Bergmann, M., J. Röthig, J. Seibold und A. Zeuner*, Methode zur Ölverbrauchsmessung durch Markierung mit radioaktivem Brom, MTZ Motortechnische Zeitschrift, 58 (1997) 2, S. 102-107.
- [23] *Bigg, D. und S. Middleman*, Mixing in a Screw Extruder. A Model for Residence Time Distribution and Strain, Ind. Eng. Chem., 13(1974), Nr. 1, S. 66-71.
- [24] *Blake, J.A.*, Evaluation of an on farm press, Vegetable oil fuels (proceedings of the international conference on plant an vegetable oils as fuels (8/1982)
- [25] *Bredeson, D.K.*, Mechanical Pressing, JAOCs, **54**(1977), Nr. 6, 489-490.
- [26] *Darnell, W.H. und E.A.J. Mol*, Solids conveying in Extruders, SPE Journal, April, 1956, 21 - 29.
- [27] *DGF Standard Methods*; Section B – Fatty Raw Materials; B-I 4 (88); Moisture and volatile matter.
- [28] *Eggers, R. und G. Kaschel*, Verformungseigenschaften von Ölsaaten während des Abpressvorganges, Fat Sci. Technol., **91**(1989), Nr. 6, 213 - 219.
- [29] *Eggers, R., H. Boeck und W. Stein*, Messung von Druck- und Temperaturprofilen beim Abpressen von Ölsaaten in Seiher-Schneckenpressen, Fette Seifen Anstrichmittel, **87**(1985), Nr. 5, 494 - 499.
- [30] *Eggers, R.*, Gasdichtigkeit von Rapssaat unter mechanischer Druck-beaufschlagung, Fat Sci. Technol., **90**(1988)., Nr. 5, 184 - 188.

- [31] *Ellermann, I., D. Baumgart, H. Relitz, P. Specht und G. Pocher*, Anordnung zur Messung des radialen Drucks in Seiher-Schneckenpressen, Deutsches Patentamt, Offenlegungsschrift DE 38 44 462 A1 vom 22.02.1990.
- [32] *Fischer, P.*, Auslegung von Einschneckenextrudern auf der Grundlage verfahrenstechnischer Kenndaten, Dissertation 1976.
- [33] *Flegel, G. und K. Birnstiel*, Elektrotechnik für den Maschinenbauer, 6. Aufl. Hanser-Verlag 1982.
- [34] *Goldowskij A. M.*: Unsere physikalisch-chemische Theorie der Pflanzenöl-Gewinnungsprozesse, ihre experimentelle Beweisführung und ihre Anwendung in der Praxis. Fettchemische Umschau 43(1936), 21 und 43, 28
- [35] *Homann, Th., M. Knuth, K.-D. Miksche und W. Stein*, Die mechanische Fest-Flüssig-Trennung mittels Seiher-Schneckenpressen in der Speiseölindustrie, Fette Seifen Anstrichmittel, **80**(1978), Nr. 4, 146 - 149.
- [36] *International Standards Organisation*, Oilseeds - Determination of moisture and volatile matter content. Standard No. 665, Geneva, 1977.
- [37] *Ivanenko, A. V. und N.V. Morozov*, Über einige Prozesse an einer Versuchspresse zur Verarbeitung von Traubenkernen, Moskau, Piscevaja Promyslennost, (1969), Nr. 10, S. 132-137.
- [38] *JENOPTIK*, Betriebsanleitung VARIOSCAN Modell 3012 (1998).
- [39] *Johnstone, R.*, Pilot plants, models and scaleup methods in chemical engineering, McGraw-Hill Book Company, New York 1957.
- [40] *Knuth, M., K.-D. Mischke und W. Stein*, Speiseölgewinnung aus pflanzlichen Rohstoffen durch Abpressen, Seifen-Öle-Fette-Wachse, **103**(1977), Nr. 14; 385-388.
- [41] *Knuth, M. und Th. Homann, Fried. Krupp GmbH*: Verfahren und Vorrichtung zur Ölgewinnung aus gereinigten Ölfrüchten und Ölsaaten, Deutsches Patentamt, Offenlegungsschrift 29 15 538 vom 23.10.1980
- [42] *KT-Lehrblätter*, Maschinen und Prozesse der Kunststoffverarbeitung, KT 12/71, Institut für Kunststofftechnologie, Universität Stuttgart (TH)
- [43] *Lengerich, B. H. van.*, Entwicklung und Anwendung eines rechnerunterstützten systemanalytischen Modells zur Extrusion von stärkehaltigen Rohstoffen, Dissertation, TU Berlin, 1984.
- [44] *Melnik, G.E., V.V. Kljuckin und V.S. Morozov*, Über die Intensität des Öl-abpressens in Schneckenpressen., Moskau, Maslobojno Zirovaja Promyslennost, (1979), S. 12 - 14.
- [45] *Merrikin, E.J. und J.A. Ward*, On farm production of Fuel From Vegetable Oil. Beyond the Energy Crisis: Opportunity and Challenge Vol.III S.1697-1705
- [46] *Meskat, W. und K. Riess*, Schneckenmaschinen für die Verfahrenstechnik zähflüssiger und plastischer Massen, Chem.-Ing.-Techn., 23(1951), Nr. 9/10, S. 205-212.

- [47] *Meskat, W.*, Der Fließ- und Entlaugungsvorgang einer Alkalicellulosefaser-Suspension in einer Schneckenpresse, Chem.-Ing.-Techn., **34**(1962), 742-748
- [48] *Morozov, V. S. und N.M. Afanas'eva*, Die Untersuchung der Beeinflussung der Druckhöhe in der Presse auf die Qualität des Öles und des Ölkuchens, Leningrad, VNIIZ, Trudy, (1972), Nr. 29, S. 56 - 59.
- [49] *Morozov, V.S.*, Bestimmung der Radialdrücke und Axialkräfte im Pressgranulator und der Presse FP, Leningrad, VNIIZ, Trudy, (1972), Nr. 29, 11-15.
- [50] *Nazarov, N. I., B.M. Azarov, Ju.L. Azarov und N.G. Chabova*, Die Bewegung von Lebensmittelmassen im Kanal einer Schneckenpresse, Krasnodar, Izvestija vyssich ucebnych zavedenij. Piscevaja Technologija, (1973), Nr. 1, S. 133-137.
- [51] *Omobuwajo, T.O., M.T. Ige und O.A. Ajayi*, Heat Transfer between the Pressing Chamber and the Oil and Oilcake Streams during Screw Expeller Processing of Palm Kernel Seeds, Journal of Food Engineering, **31**(1997), Nr. 1, 1-7.
- [52] *Pawlowski, J.*, Stoffaustausch und Strömungsbahnen in einspindeligen Schnecken beim Fördern von zähen Flüssigkeiten, Chemie-Ing.-Techn., **34**(1962), Nr. 11, 749-751.
- [53] *Pawlowski, J.*, Die Ähnlichkeitstheorie in der physikalisch-technischen Forschung, Springer-Verlag, Berlin, 1971.
- [54] *Pippel, W.*, Verweilzeitanalyse in technologischen Strömungssystemen, Akademie-Verlag Berlin, 1978
- [55] *Potente, H. und S. Schultheis*, Untersuchungen zum Verweilzeit- und Längsmischverhalten, Plastverarbeiter, **39**(1988), Nr. 12, S. 60-69.
- [56] *Potente, H., S. Schultheis und K.P. Voss*, Die Schmelze im Werkzeug durchstrahlen, Plastverarbeiter, **39**(1988), Nr. 3, S. 149-159.
- [57] *Potente, H.* Auslegen von Schneckenmaschinen-Baureihen, Carl Hanser Verlag, 1. Auflage, München Wien, 1981
- [58] *Prinsloo, M. und F.J.C. Hugo*, On farm Sunflower Oil Extraction for Fuel Purposes, Beyond the Energy Crisis: Opportunity and Challenge Vol.III S.1697-1705
- [59] *Pritchard, J. L. R.*: Analysis and Properties of Oilseeds. In: Analysis of Oilseeds, Fats and Fatty Foods. Hrsg. Rossel, Pritchard. Elsevier Applied Science, London and New York
- [60] *Raß, M.*: Zur Rheologie des biogenen Feststoffs unter Kompression am Beispiel geschälter Rapssaat. Dissertation, UniGH Essen, 2000.
- [61] *Schenkel, G.*: Modelltheorie der Kunststoffextruder. Industrie-Anzeiger, 1972.
- [62] *Schneider, K.*, Der Fördervorgang in der Einzugszone eines Extruders, Dissertation, TH Aachen, 1966.

- [63] *Schneider, F.H. und D. Khoo*, Trennpresen - Versuch einer Bestandsaufnahme experimenteller Arbeiten, *Fette Seifen Anstrichmittel*, **88**(1986) Nr. 9, 329 - 340.
- [64] *Schneider, F. H. und U. Rütte*: Resthexan in Raps-Schroten I: Zur Entstehung einer intrazellularen Miszella. *Fat Sci. Technol.* 93(1991)9, 319
- [65] *Schneider, F. H. und U. Rütte*: Zur Wasserbestimmung in vegetabilen Ölröhstoffen. *Fette Seifen Anstrichmittel* 83(1981)9, 329-337.
- [66] *Schneider, F. H.*: Schälung von Rapssaat durch definierte Verformung, Teil I: Untersuchungen zur Saatanatomie. *Fette Seifen Anstrichmittel* 81(1979)1, 11-16
- [67] *Schneider, F. H.*: Schälung von Rapssaat durch definierte Verformung, Teil II; Untersuchungen zum Schälverhalten. *Fette Seifen Anstrichmittel* 81(1979)2, 53-59
- [68] *Schneider, F. H. und M. Raß*: Trennpresen geschälter Rapssaat - Zielsetzung und verfahrenstechnische Probleme. *Fett/Lipid* 99(1997)3, 91-98
- [69] *Singer, M.*, Theorie und Praxis der Ölgewinnung durch Pressung, *Seifen-Öle-Fette-Wachse*, **107**(1981), Nr. 19, 585-587.
- [70] *Sivakumaran, K. und J.W. Goodrum*, Influence of Internal Pressure on Performance of a Small Screw Expeller, *Transactions of the ASAE*, Vol. 30(4):July-August, 1987.
- [71] *Sokolov, A. J.*; Pressen der Nahrungs- und Futtermittelindustrie, Moskau, Mascinostroenie, Moskau 1973.
- [72] *Tindale, L. H. und S. R. Hill-Haas*; Current equipment for mechanical oil extraction. *JAOCS* 53(1976)6, 265-270
- [73] *Tolcinskij, J. A.*, Beschreibung der Bewegung von Zweiphasen-Stoffen, bestehend aus Partikeln und Flüssigkeit, in Schneckenkanälen, Krasnodar, Izvestija vyssich ucebnych zavedenij. *Piscevaja Technologija*, (1994), Nr. 1-2, S. 74-76.
- [74] *Vadke, V.S., F.W. Sosulski und C.A. Shook*, Mathematical Simulation of an Oilseed Press, *JAOCS*, **65**(1988), Nr. 10, 1610-1616.
- [75] *Vadke, V.S. und F.W. Sosulski*: Mechanics of oil expression from Canola. *JAOCS* 65(1988)7, 1169-1176
- [76] *Ward, J.A.*, Processing High Oil Content Seeds in Continous Screw Presses, *JAOCS*, 53(1976), Nr. 6, 261-264.
- [77] *Ward, J.A.*, Pre-Pressing of Oil from Rapeseed and Sunflower, *JAOCS*, **61**(1984), Nr. 8, 1358-1361.
- [78] *Zajic, J., E. Volhejn und A. Jirousek*, Abhängigkeit der Radialdrücke in der Schneckenpresse von den technologischen Bedingungen beim Rapssamenpressen, *Fette Seifen Anstrichmittel*, **88**(1986), Nr. 6, 231 - 238.

7 Anhang

Tab. 7-1: Geometrieparameter der Pressstufen im 4-stufigen Schnecken-Experiment

Press- stufe	D 80-6			$\kappa = 1$	$\kappa = 0,5$	$\kappa < 0,1$
	Längenbez.	Δz [mm]	Δz [%]	Δx [mm]	Δx [mm]	Δx [mm]
1	(L _R 01)	-	-	-	-	22,25
	L _K 1	4,0	32	52,5	26,25	4,0
	L _R 1	-	-	-	26,25	26,25
	L _F 1			52,5	52,5	52,5
2	(L _R 02)	-	-	-	-	23,25
	L _K 2	3,0	24	52,5	26,25	3,0
	L _R 2	-	-	-	26,25	26,25
	L _F 2			52,5	52,5	52,5
3	(L _R 03)	-	-	-	-	24,25
	L _K 3	2,0	16	52,5	26,25	2,0
	L _R 3	-	-	-	26,25	26,25
	L _F 3			52,5	52,5	52,5
4	(L _R 04)	-	-	-	-	24,75
	L _K 4	1,5	12	52,5	26,25	1,5
	L _R 4	-	-	-	26,25	26,25
	L _F 4			52,5	52,5	52,5
5	(L _R 05)	-	-	-	-	25,25
	L _K 5	1,0	8	52,5	26,25	1,0
	L _R 5	-	-	-	26,25	26,25
	L _F 5			52,5	52,5	52,5
6	(L _R 06)	-	-	-	-	25,25
	L _K 6	1,0	8	52,5	26,25	1,0
	L _R 6	-	-	-	26,25	26,25
	L _F 6			52,5	52,5	52,5

Tab. 7-2: Geometrieparameter der Pressstufen im 4-stufigen Schnecken-Experiment

Press- stufe	D 80-4			$\kappa = 1$	$\kappa = 0,5$	$\kappa < 0,1$
	Längenbez.	Δz [mm]	Δz [%]	Δx [mm]	Δx [mm]	Δx [mm]
1	(L _R 01)	-	-	-	-	21,25
	L _K 1	5,0	40	52,5	26,25	5,0
	L _R 1	-	-	-	26,25	26,25
	L _F 1			52,5	52,5	52,5
2	(L _R 02)	-	-	-	-	22,25
	L _K 2	4,0	32	52,5	26,25	4,0
	L _R 2	-	-	-	26,25	26,25
	L _F 2			52,5	52,5	52,5
3	(L _R 03)	-	-	-	-	24,25
	L _K 3	2,0	16	52,5	26,25	2,0
	L _R 3	-	-	-	26,25	26,25
	L _F 3			52,5	52,5	52,5
4	(L _R 04)			-	-	24,75
	L _K 4	1,5	12	52,5	26,25	1,5
	L _R 4	-	-	-	26,25	26,25
	L _F 4			52,5	52,5	52,5

Tab. 7-3: Kompressions-Parameter aus der Transformation des 4-stufigen Schnecken-Experiments auf ein 4-stufiges Linear-Experiment

	4-stufiges Linear-Experiment								
Stufe				$\kappa = 1$		$\kappa = 0,5$		$\kappa < 0,1$	
	Bezeichn.	Δz [mm]	Δz [%]	Δt [s]	$\dot{\epsilon}$ [*]	Δt [s]	$\dot{\epsilon}$ [*]	Δt [s]	$\dot{\epsilon}$ [*]
1	(L _R 01)	-	-	-	-	-	-	9,11	0
	L _K 1	1,40	40	22,5	3,73	11,25	7,47	2,14	39,25
	L _R 1	-	-	22,5	0	33,75	0	33,75	0
2	(L _R 02)	-	-	-	-	-	-	9,54	0
	L _K 2	1,12	32	22,5	2,99	11,25	5,97	1,71	39,30
	L _R 2	-	-	22,5	0	33,75	0	33,75	0
3	(L _R 03)	-	-	-	-	-	-	10,39	0
	L _K 3	0,56	16	22,5	1,49	11,25	2,99	0,86	39,07
	L _R 3	-	-	22,5	0	33,75	0	33,75	0
4	(L _R 04)	-	-	-	-	-	-	10,61	0
	L _K 4	0,42	12	22,5	1,12	11,25	2,24	0,64	39,38
	L _R 4	-	-	22,5	0	33,75	0	33,75	0

* $\dot{\epsilon}$ [mm/min]

Tab. 7-4: Kompressions-Parameter aus der Transformation des 6-stufigen Schnecken-Experiments auf ein 6-stufiges Linear-Experiment

	6-stufiges Linear-Experiment								
Stufe				$\kappa = 1$		$\kappa = 0,5$		$\kappa < 0,1$	
	Bezeichn.	Δz [mm]	Δz [%]	Δt [s]	$\dot{\epsilon}$ [*]	Δt [s]	$\dot{\epsilon}$ [*]	Δt [s]	$\dot{\epsilon}$ [*]
1	(L _R 01)	-	-	-	-	-	-	9,54	0
	L _K 1	1,12	32	22,5	2,99	11,25	5,97	1,71	39,30
	L _R 1	-	-	22,5	0	33,75	0	33,75	0
2	(L _R 02)	-	-	-	-	-	-	9,96	0
	L _K 2	0,84	24	22,5	2,24	11,25	4,48	1,29	39,07
	L _R 2	-	-	22,5	0	33,75	0	33,75	0
3	(L _R 03)	-	-	-	-	-	-	10,39	0
	L _K 3	0,56	16	22,5	1,49	11,25	2,99	0,86	39,07
	L _R 3	-	-	22,5	0	33,75	0	33,75	0
4	(L _R 04)	-	-	-	-	-	-	10,61	0
	L _K 4	0,42	12	22,5	1,12	11,25	2,24	0,64	39,38
	L _R 4	-	-	22,5	0	33,75	0	33,75	0
5	(L _R 05)	-	-	-	-	-	-	10,82	0
	L _K 5	0,28	8	22,5	0,75	11,25	1,49	0,43	39,07
	L _R 5	-	-	22,5	0	33,75	0	33,75	0
6	(L _R 06)	-	-	-	-	-	-	10,82	0
	L _K 6	0,28	8	22,5	0,75	11,25	1,49	0,43	39,07
	L _R 6	-	-	22,5	0	33,75	0	33,75	0

* $\dot{\epsilon}$ [mm/min]

Tab. 7-5: Versuche zur Funktion der Helixgeometrie. Übersicht über die Versuchsmatrix (Teil 1)

Seiher		Schnecke			Drehzahl		Komprimat				
-	σ [°]	K	F	κ [-]	u_{ax} [mm/s]	n [min ⁻¹]	xH [%]	D [%]	ω [%]	xW [%]	T [°C]
Geschlossener Schneckensteg											
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	0	25	6,0	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	0	85	4,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	10,50	12	5	0	25	6,0	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	10,50	12	5	0	85	4,5	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	1	15,75	18	5	0	25	6,0	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	1	15,75	18	5	0	85	4,5	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	1	10,50	12	5	0	25	6,0	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	1	10,50	12	5	0	85	4,5	25
Geschlossener Schneckensteg mit veränderten Seiherstäben											
D 80-4	10/10/7.5/7.5	4	4	1	15,75	18	5	0	25	6,0	25
D 80-4	10/10/7.5/7.5	4	4	1	15,75	18	5	0	85	4,5	25
D 80-4	10/10/7.5/7.5	4	4	1	10,50	12	5	0	25	6,0	25
D 80-4	10/10/7.5/7.5	4	4	1	10,50	12	5	0	85	4,5	25
Geschlossener Schneckensteg mit Abstreifplatten am Seiheranfang											
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	0	25	6,0	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	0	85	4,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	10,50	12	5	0	25	6,0	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	10,50	12	5	0	85	4,5	25
Geschlossener Schneckensteg mit Drossel am Mundstück											
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	0	25	6,0	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	0	85	4,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	10,50	12	5	0	25	6,0	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	10,50	12	5	0	85	4,5	25

Tab. 7-5: Versuche zur Funktion der Helixgeometrie. Übersicht über die Versuchsmatrix (Teil 2)

Seiher		Schnecke			Drehzahl		Komprimat				
-	σ [°]	K	F	κ [-]	u_{ax} [mm/s]	n [min ⁻¹]	xH [%]	D [%]	ω [%]	xW [%]	T [°C]
Unterbrochener Schneckensteg											
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	0	25	6,0	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	0	85	4,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	10,50	12	5	0	25	6,0	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	10,50	12	5	0	85	4,5	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	1	15,75	18	5	0	25	6,0	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	1	15,75	18	5	0	85	4,5	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	1	10,50	12	5	0	25	6,0	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	1	10,50	12	5	0	85	4,5	25
Unterbrochener Schneckensteg mit veränderten Seiherstäben											
D 80-4	10/10/7.5/7.5	4	4	1	15,75	18	5	0	25	6,0	25
D 80-4	10/10/7.5/7.5	4	4	1	15,75	18	5	0	85	4,5	25
D 80-4	10/10/7.5/7.5	4	4	1	10,50	12	5	0	25	6,0	25
D 80-4	10/10/7.5/7.5	4	4	1	10,50	12	5	0	85	4,5	25
Unterbrochener Schneckensteg / Förderelemente mit $\kappa = 1$											
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	0	25	6,0	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	0	85	4,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	10,50	12	5	0	25	6,0	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	10,50	12	5	0	85	4,5	25

Tab. 7-6: Versuche zum Einfluss der Komprimateneigenschaften. Übersicht über die Versuchsmatrix

Seiher		Schnecke			Drehzahl		Komprimat				
-	σ [°]	K	F	κ [-]	u_{ax} [mm/s]	n [min ⁻¹]	xH [%]	D [%]	ω [%]	xW [%]	T [°C]
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	100	85	4,0	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	100	85	4,7	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	100	85	4,9	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	100	85	2,6	50
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	100	85	3,7	50
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	100	25	2,0	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	100	25	3,7	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	100	25	3,7	70
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	100	25	4,8	70
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	0	85	7,4	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	0	85	2,4	50
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	0	25	2,7	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	0	25	7,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	0	25	2,9	70
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	17	100	85	3,7	50
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	17	100	85	4,2	50
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	17	100	25	3,9	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	17	100	25	4,2	70
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	17	100	25	5,6	70
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	17	0	25	6,9	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	17	0	85	2,9	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	17	0	85	7,0	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	17	0	85	3,7	70

Tab. 7-7: Versuche zum kontinuierlichen Trennpresen in Schnecken-geometrien. Übersicht über die Versuchsmatrix zur Pressen-Konfiguration D 80-4

Seiher		Schnecke			Drehzahl		Komprimat				
-	σ [°]	K	F	κ [-]	u_{ax} [mm/s]	n [min ⁻¹]	xH [%]	D [%]	ω [%]	xW [%]	T [°C]
Kurzer Seiher mit unterbrochenem Schneckensteg											
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	0	23	6,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	10,50	12	5	0	25	4,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	5,25	6	5	0	85	6,0	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	0	23	6,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	10,50	12	5	0	25	4,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	5,25	6	5	0	85	6,0	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	15,75	18	5	0	23	6,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	10,50	12	5	0	25	4,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	1	5,25	6	5	0	85	6,0	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	0.5	15,75	18	5	0	23	6,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	0.5	10,50	12	5	0	25	4,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	0.5	5,25	6	5	0	85	6,0	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	0.5	15,75	18	5	0	23	6,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	0.5	10,50	12	5	0	25	4,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	0.5	5,25	6	5	0	85	6,0	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	0.5	15,75	18	5	0	23	6,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	0.5	10,50	12	5	0	25	4,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	0.5	5,25	6	5	0	85	6,0	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	0.1	15,75	18	5	0	23	6,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	0.1	10,50	12	5	0	25	4,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	0.1	5,25	6	5	0	85	6,0	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	0.1	15,75	18	5	0	23	6,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	0.1	10,50	12	5	0	25	4,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	0.1	5,25	6	5	0	85	6,0	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	0.1	15,75	18	5	0	23	6,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	0.1	10,50	12	5	0	25	4,5	25
D 80-4	5/5/5/5	4	4	0.1	5,25	6	5	0	85	6,0	25

Tab. 7-8: Versuche zum kontinuierlichen Trennpresen in Schnecken-geometrien. Übersicht über die Versuchsmatrix zur Seiher-konfiguration D 80-6

Seiher		Schnecke			Drehzahl		Komprimat				
-	σ [°]	K	F	κ [-]	u_{ax} [mm/s]	n [min ⁻¹]	xH [%]	D [%]	ω [%]	xW [%]	T [°C]
Kurzer Seiher mit unterbrochenem Schneckensteg											
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	1	15,75	18	5	0	23	6,5	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	1	10,50	12	5	0	25	4,5	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	1	5,25	6	5	0	85	6,0	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	1	15,75	18	5	0	23	6,5	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	1	10,50	12	5	0	25	4,5	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	1	5,25	6	5	0	85	6,0	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	1	15,75	18	5	0	23	6,5	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	1	10,50	12	5	0	25	4,5	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	1	5,25	6	5	0	85	6,0	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	0.5	15,75	18	5	0	23	6,5	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	0.5	10,50	12	5	0	25	4,5	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	0.5	5,25	6	5	0	85	6,0	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	0.5	15,75	18	5	0	23	6,5	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	0.5	10,50	12	5	0	25	4,5	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	0.5	5,25	6	5	0	85	6,0	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	0.1	15,75	18	5	0	23	6,5	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	0.1	10,50	12	5	0	25	4,5	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	0.1	5,25	6	5	0	85	6,0	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	0.1	15,75	18	5	0	23	6,5	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	0.1	10,50	12	5	0	25	4,5	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	0.1	5,25	6	5	0	85	6,0	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	0.1	15,75	18	5	0	23	6,5	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	0.1	10,50	12	5	0	25	4,5	25
D 80-6	5/5/5/5/5/5	6	6	0.1	5,25	6	5	0	85	6,0	25

Tab. 7-9: Kraftreaktion von Rapsbruch, 4-stufiges Schnecken-Experiment, Variation von Kerngeometrie und Drehzahl (vgl. Abb. 3-28)

Kern- geometrie	\hat{p}_i [bar]	\bar{p}_i [bar]	$\vee p_i$ [bar]	\hat{p}_i [bar]	\bar{p}_i [bar]	$\vee p_i$ [bar]	\hat{p}_i [bar]	\bar{p}_i [bar]	$\vee p_i$ [bar]	Press- stufe
$\kappa = 1$	4	1	<1	2	1	<1	2	1	<1	1
	35	6	1	41	6	1	35	4	1	2
	70	24	4	58	17	6	73	18	5	3
	100	30	6	87	29	8	114	32	7	4
$\kappa = 0,5$	1	1	<1	3	1	<1	2	1	<1	1
	21	5	2	37	7	3	33	6	3	2
	72	20	3	65	22	4	70	21	3	3
	96	28	7	75	29	7	75	28	7	4
$\kappa < 0,1$	4	1	<1	2	1	<1	2	1	<1	1
	25	6	1	21	4	1	22	5	1	2
	57	23	6	52	16	6	58	16	4	3
	78	24	9	91	25	7	77	26	5	4
u_{ax} [mm/s]	15,75			10,50			5,25			
(n [min ⁻¹])	18			12			6			

Tab. 7-10: Kraftreaktion von Rapsbruch, 6-stufiges Schnecken-Experiment, Variation von Kerngeometrie und Drehzahl (vgl. Abb. 3-29)

Kern- geometrie	\hat{p}_i [bar]	\bar{p}_i [bar]	$\vee p_i$ [bar]	\hat{p}_i [bar]	\bar{p}_i [bar]	$\vee p_i$ [bar]	\hat{p}_i [bar]	\bar{p}_i [bar]	$\vee p_i$ [bar]	Press- stufe
$\kappa = 1$	5	2	<1	12	5	2	5	2	<1	1
	66	18	4	68	15	5	56	19	2	2
	82	21	3	78	17	5	87	20	6	3
	86	28	5	79	25	7	117	32	14	4
	96	38	10	114	26	8	164	73	16	5
	49	23	8	66	25	13	75	27	10	6
$\kappa = 0,5$	3	1	<1	3	<1	<1	4	2	<1	1
	80	16	5	66	20	5	80	18	3	2
	95	17	6	71	21	4	91	15	3	3
	72	24	5	90	26	8	93	25	5	4
	75	24	5	104	48	9	118	46	5	5
	65	15	8	75	25	4	101	25	6	6
$\kappa < 0,1$	5	2	1	2	1	<1	3	1	<1	1
	79	28	6	78	26	5	78	24	7	2
	94	24	5	109	26	3	146	24	4	3
	96	28	5	115	29	5	133	27	7	4
	64	25	5	118	28	5	129	47	6	5
	62	24	7	91	27	13	107	24	6	6
u_{ax} [mm/s]	15,75			10,50			5,25			
(n [min ⁻¹])	18			12			6			

Tab. 7-11: Kraftreaktion von Schälrap, 4-stufiges Schnecken-Experiment, Variation von Kerngeometrie und Drehzahl (vgl. Abb. 3-30)

Kern- geometrie	\hat{p}_i [bar]	\bar{p}_i [bar]	$\vee p_i$ [bar]	\hat{p}_i [bar]	\bar{p}_i [bar]	$\vee p_i$ [bar]	\hat{p}_i [bar]	\bar{p}_i [bar]	$\vee p_i$ [bar]	Press- stufe
$\kappa = 1$	2	1	<1	2	1	<1	2	1	<1	1
	50	18	2	34	11	3	44	15	2	2
	49	22	4	40	20	3	47	18	4	3
	72	31	5	66	25	5	69	21	4	4
$\kappa = 0,5$	2	1	<1	2	1	<1	2	1	<1	1
	42	11	2	50	16	2	46	15	2	2
	40	18	3	48	19	4	44	22	3	3
	46	21	4	65	25	5	51	25	4	4
$\kappa < 0,1$	3	1	<1	4	2	<1	3	1	<1	1
	26	9	1	34	11	2	30	9	2	2
	27	14	4	34	13	5	31	14	4	3
	49	17	4	51	19	4	53	18	4	4
u_{ax} [mm/s]	15,75			10,50			5,25			
(n [min ⁻¹])	18			12			6			

Tab. 7-12: Kraftreaktion von Schälrap, 6-stufiges Schnecken-Experiment, Variation von Kerngeometrie und Drehzahl (vgl. Abb. 3-31)

Kern- geometrie	\hat{p}_i [bar]	\bar{p}_i [bar]	$\vee p_i$ [bar]	\hat{p}_i [bar]	\bar{p}_i [bar]	$\vee p_i$ [bar]	\hat{p}_i [bar]	\bar{p}_i [bar]	$\vee p_i$ [bar]	Press- stufe
$\kappa = 1$	5	2	1	9	3	1	8	2	1	1
	40	12	3	45	14	4	52	12	3	2
	59	17	6	54	19	6	61	13	6	3
	60	23	5	63	24	6	77	23	5	4
	65	26	6	71	27	8	82	26	6	5
	37	14	4	41	21	2	42	18	8	6
$\kappa = 0,5$	2	1	0	2	1	<1	5	2	1	1
	42	19	6	43	17	4	52	15	4	2
	58	18	5	68	18	4	64	19	4	3
	62	23	5	73	23	5	54	19	5	4
	63	33	7	68	29	9	70	29	5	5
	52	23	9	63	22	8	52	27	8	6
$\kappa < 0,1$	6	3	1	3	2	1	4	3	1	1
	53	22	7	60	22	5	60	23	5	2
	61	21	7	62	20	6	61	20	5	3
	80	25	6	65	25	5	73	25	4	4
	83	36	9	92	36	7	110	36	6	5
	39	18	8	51	22	6	63	20	4	6
u_{ax} [mm/s]	15,75			10,50			5,25			
(n [min ⁻¹])	18			12			6			

Tab. 7-13: Kraftreaktion von Schälfflocken, 4-stuf. Schnecken-Experiment, Variation von Kerngeometrie und Drehzahl (vgl. Abb. 3-32)

Kern- geometrie	\hat{p}_i [bar]	\bar{p}_i [bar]	$\vee p_i$ [bar]	\hat{p}_i [bar]	\bar{p}_i [bar]	$\vee p_i$ [bar]	\hat{p}_i [bar]	\bar{p}_i [bar]	$\vee p_i$ [bar]	Press- stufe
$\kappa = 1$	12	3	<1	11	4	<1	11	4	<1	1
	25	6	1	21	4	1	23	5	1	2
	27	5	1	26	9	3	26	7	1	3
	32	8	3	31	7	2	32	8	2	4
$\kappa = 0,5$	5	2	1	11	3	<1	8	3	1	1
	19	5	2	24	7	1	26	6	1	2
	24	8	1	26	10	1	25	9	1	3
	31	11	2	38	15	2	35	13	2	4
$\kappa < 0,1$	12	4	<1	14	3	1	13	4	<1	1
	11	4	1	13	2	1	12	3	1	2
	13	5	1	15	4	2	13	4	1	3
	25	10	3	29	10	3	27	10	3	4
u_{ax} [mm/s]	15,75			10,50			5,25			
(n [min ⁻¹])	18			12			6			

Tab. 7-14: Kraftreaktion von Schälfflocken, 6-stuf. Schnecken-Experiment, Variation von Kerngeometrie und Drehzahl (vgl. Abb. 3-33)

Kern- geometrie	\hat{p}_i [bar]	\bar{p}_i [bar]	$\vee p_i$ [bar]	\hat{p}_i [bar]	\bar{p}_i [bar]	$\vee p_i$ [bar]	\hat{p}_i [bar]	\bar{p}_i [bar]	$\vee p_i$ [bar]	Press- stufe
$\kappa = 1$	12	4	<1	9	3	<1	9	2	<1	1
	31	10	1	32	5	1	30	7	1	2
	30	11	1	47	10	2	36	14	3	3
	40	13	2	53	17	2	50	25	6	4
	40	10	3	64	41	7	51	27	10	5
	34	9	2	50	15	5	48	25	9	6
$\kappa = 0,5$	2	<1	<1	3	1	<1	3	1	<1	1
	21	5	<1	28	14	2	30	4	1	2
	32	9	4	49	16	5	44	9	1	3
	31	11	5	47	17	6	45	11	5	4
	42	18	5	51	20	7	51	18	4	5
	27	15	11	44	18	5	35	17	6	6
$\kappa < 0,1$	5	2	<1	4	2	<1	3	1	<1	1
	42	12	3	31	10	1	28	4	<1	2
	46	15	5	41	11	2	31	5	2	3
	48	15	6	45	12	3	40	14	4	4
	52	19	6	60	18	5	52	29	2	5
	31	16	6	30	12	3	32	27	2	6
u_{ax} [mm/s]	15,75			10,50			5,25			
(n [min ⁻¹])	18			12			6			

Tab. 7-15: Schnecken-Experiment D 80-4: Massenbilanz unter Variation von Kerngeometrie, Drehzahl und Komprimat (vgl. Abb. 3-40)

Kern- geometrie	m_K [kg/h]	m_E [kg/h]	XC_S	m_K [kg/h]	m_E [kg/h]	XC_S	m_K [kg/h]	m_E [kg/h]	XC_S	Komprimat Bezeichnung
$\kappa = 1$	34,0	3,6	0,47	22,0	4,0	0,45	12,0	2,2	0,35	Schälflocken
	33,0	5,7	0,57	23,0	4,9	0,51	11,0	2,8	0,43	Rapsbruch
	40,0	9,7	0,40	26,0	7,1	0,37	12,0	3,5	0,27	Schälrap
$\kappa = 0,5$	27,0	4,9	0,45	21,0	4,8	0,41	10,0	2,3	0,32	Schälflocken
	31,0	6,4	0,53	24,0	5,4	0,49	10,0	2,3	0,48	Rapsbruch
	36,0	8,5	0,41	26,0	7,3	0,36	13,0	3,6	0,27	Schälrap
$\kappa < 0,1$	25,0	3,8	0,48	15,0	2,8	0,44	8,0	1,7	0,30	Schälflocken
	32,0	4,9	0,63	21,0	3,8	0,57	11,0	2,5	0,48	Rapsbruch
	35,0	8,1	0,48	22,0	6,1	0,35	12,0	3,5	0,30	Schälrap
u_{ax} [mm/s]	15,75			10,50			5,25			
(n [min ⁻¹])	18			12			6			

Gemittelte Werte aus Doppelmessungen ($m_S = m_K - m_E$)

Tab. 7-16: Schnecken-Experiment D 80-6: Massenbilanz unter Variation von Kerngeometrie, Drehzahl und Komprimat (vgl. Abb. 3-41)

Schnecken- geometrie	m_K [kg/h]	m_E [kg/h]	XC_S	m_K [kg/h]	m_E [kg/h]	XC_S	m_K [kg/h]	m_E [kg/h]	XC_S	Komprimat Bezeichnung
$\kappa = 1$	38,0	11,2	0,50	27,0	9,9	0,38	15,0	6,1	0,33	Schälflocken
	43,0	12,3	0,28	30,0	9,1	0,24	15,0	5,4	0,17	Rapsbruch
	51,0	17,8	0,43	34,0	12,4	0,35	16,0	6,3	0,28	Schälrap
$\kappa = 0,5$	42,0	11,6	0,59	25,0	7,7	0,50	13,0	4,4	0,41	Schälflocken
	44,0	12,7	0,34	31,0	9,0	0,22	14,0	4,7	0,18	Rapsbruch
	54,0	18,7	0,42	36,0	13,8	0,32	18,0	7,3	0,26	Schälrap
$\kappa < 0,1$	38,0	11,3	0,52	26,0	8,4	0,41	13,0	5,2	0,30	Schälflocken
	42,0	13,3	0,23	28,0	9,3	0,19	15,0	5,0	0,16	Rapsbruch
	47,0	18,0	0,36	36,0	14,7	0,33	18,0	8,0	0,25	Schälrap
u_{ax} [mm/s]	15,75			10,50			5,25			
(n [min ⁻¹])	18			12			6			

Gemittelte Werte aus Doppelmessungen ($m_S = m_K - m_E$)

Tab. 7-17: Schnecken-Experiment D 80-4: Energiebilanz unter Variation von Kerngeometrie, Drehzahl und Komprimat (vgl. Abb. 3-42)

Kern- geometrie	SME _K [kJ/kg]	SME _E [kJ/kg]	T _E [°C]	SME _K [kJ/kg]	SME _E [kJ/kg]	T _E [°C]	SME _K [kJ/kg]	SME _E [kJ/kg]	T _E [°C]	Komprimat Bezeichnung
$\kappa = 1$	57,0	9,8	39	70,9	15,1	37	109,3	27,3	38	Rapsbruch
	50,8	9,6	43	80,4	21,8	42	97,8	28,4	42	Schälrap
	42,1	4,4	37	72,5	13,2	35	90,0	16,4	38	Schälfflocken
$\kappa = 0,5$	52,6	10,9	39	68,0	15,2	38	104,4	24,3	39	Rapsbruch
	55,8	13,2	41	86,0	24,1	41	88,1	24,4	41	Schälrap
	44,5	8,0	35	77,7	17,8	36	83,2	18,9	37	Schälfflocken
$\kappa < 0,1$	35,7	5,5	36	57,1	10,2	36	90,3	20,4	36	Rapsbruch
	54,5	12,6	39	74,3	20,7	39	87,3	25,2	40	Schälrap
	38,9	6,0	33	70,2	15,0	35	89,1	19,4	36	Schälfflocken
u _{ax} [mm/s]	15,75			10,50			5,25			
(n [min ⁻¹])	18			12			6			

Gemittelte Werte aus Doppelmessungen ($SME_S = SME_K - SME_E$)

Tab. 7-18: Schnecken-Experiment D 80-6: Energiebilanz unter Variation von Kerngeometrie, Drehzahl und Komprimat (vgl. Abb. 3-43)

Schnecken- geometrie	SME _K [kJ/kg]	SME _E [kJ/kg]	T _E [°C]	SME _K [kJ/kg]	SME _E [kJ/kg]	T _E [°C]	SME _K [kJ/kg]	SME _E [kJ/kg]	T _E [°C]	Komprimat Bezeichnung
$\kappa = 1$	118,0	33,7	54	118,3	36,0	53	158,4	56,5	57	Rapsbruch
	83,9	29,3	48	99,8	63,3	46	125,6	49,1	48	Schälrap
	56,8	16,7	42	87,9	32,3	43	108,0	43,6	43	Schälfflocken
$\kappa = 0,5$	91,6	26,3	53	114,5	33,2	54	151,5	50,4	53	Rapsbruch
	79,3	27,5	47	93,0	35,7	49	111,8	45,5	48	Schälrap
	48,6	13,4	38	81,6	25,1	39	92,5	31,0	40	Schälfflocken
$\kappa < 0,1$	89,1	28,2	52	113,1	37,5	51	146,6	49,1	52	Rapsbruch
	79,0	30,3	47	86,0	35,0	46	111,6	49,4	48	Schälrap
	51,2	15,3	40	62,7	20,3	39	88,6	35,4	41	Schälfflocken
u _{ax} [mm/s]	15,75			10,50			5,25			
(n [min ⁻¹])	18			12			6			

Gemittelte Werte aus Doppelmessungen ($SME_S = SME_K - SME_E$)

Tab. 7-19: Modelltheorien für Schneckenmaschinen: Übersicht über die Parametersätze von unterschiedlichen Modellansätzen

Quellen	Fischer [32]	Schenkel [61]	Pawlow- ski [53]	Potente [57]	Alymov [15]	John- stone [39]
Schneckenmaschine	Kst.Extd.	Kst.Extd.	Kst.Extd.	Kst.Extd.	S-Schn.p	Kst.Extd.
Geometrie-Parameter						
Seiher-Innendurchmesser			x			
Schneckendurchmesser	x	x		x		x
wirksame Länge	x	x	x			x
Schneckensteigung	x		x			
Schneckengangtiefe	x	x		x		
Schneckengangbreite				x		x
Schneckendrehzahl	x			x	x	x
Düsenkennzahl	x					
Ringspalt am Auswurf					x	
Prozess-Parameter						
Verweilzeit		x				
Massetemperatur		x	x	x	x	
Volumendurchsatz		x	x	x		x
spezif. Volumendurchsatz	x					
spezif. Antriebsenergie	x					
Schneckenleistung	x			x		x
Druck am Werkzeugeing.				x		
Massedruck		x	x			x
Schneckentemperatur			x			
Wandtemperatur		x				
Schneckendrehmoment	x			x		
Heizleistung				x		
Geschwindigkeit		x		x		
Komprimat-Parameter						
Dichte		x	x	x	x	
Dichte des Schilfers					x	
spezifische Wärme		x	x	x		
Wärmeleitfähigkeit		x	x			
Wärmeleitzahl		x	x			
therm. Ausdehnungskoeff.		x				
dynamische Viskosität		x	x			x
dyn. Viskosität des Öls					x	
Porösität des Komprimats					x	
Ölproduktivität					x	
Pressöl bez. auf Saat					x	
quasiNewton. Fluid	x	x	x			
nicht- Newton. Fluid			x			

Kst. Extd. = Kunststoff-Extruder / S-Schn.p. = Seiher-Schneckenpresse